

Trabajo Fin de Grado Grado en Ingeniería Civil

Optimización de granjas de dispositivos para la extracción de energía del oleaje

Autor: Juan Manuel Raffo Caballero

Tutor: Alejandro López Ruiz

**Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Optimización de granjas de dispositivos para la extracción de energía del oleaje

Autor:

Juan Manuel Raffo Caballero

Tutor:

Alejandro López Ruiz

Profesor Ayudante Doctor

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Optimización de granjas de dispositivos para la extracción de energía del oleaje

Autor: Juan Manuel Raffo Caballero
Tutor: Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Quiero expresar en primer lugar mi más sincero agradecimiento a mis compañeros de promoción, en especial a Javi, Fran, Agustín y Carlos por hacer más amenos y divertidos estos cuatro años. A todos mis profesores, por todo lo que nos han enseñado y por intentar transmitirnos de la mejor manera posible su conocimiento y experiencia. Mis agradecimientos a Alejandro López Ruiz, por su excelente desempeño como Tutor de este Trabajo Fin de Grado, enseñarme cuanto podía y mostrarme un nuevo campo de estudio que desconocía y me apasiona. Y por último, mis más especiales agradecimientos a mis padres, Juan Manuel y Milagros, y a mi hermana Virginia, por estar siempre ahí y apoyarme en todo momento.

Juan Manuel Raffo Caballero
Sevilla, 2017

Resumen

En las últimas décadas, la explotación de los combustibles fósiles ha dado lugar a múltiples problemas medioambientales, agravando problemas como el calentamiento global y el cambio climático. Por ello, el ser humano ha tenido que buscar nuevas fuentes de energía respetables con el medio ambiente, aquellas llamadas renovables. Sin embargo, dado que todavía dependemos en gran medida de los combustibles fósiles, es necesario un mayor desarrollo de dichas energías alternativas.

Por otro lado, mientras que energías como la solar, la eólica o la hidráulica convencional han alcanzado altos niveles de desarrollo, otras como la extracción de energía del mar aún están en fase de desarrollo. Los mares y océanos contienen ingentes cantidades de energía, de la cual sólo se aprovecha un mínimo porcentaje, por lo que es necesario avanzar aún más en este tipo de energías. Este trabajo se va a introducir en la extracción de energía del mar, más concretamente en la explotación de la energía del oleaje.

El objetivo general del trabajo es establecer una metodología para la optimización de la configuración de una granja de convertidores de energía del oleaje (Wave Energy Converters, WECs). Esta metodología se aplicará a un caso práctico en la costa de Cádiz. Para ello se va a estudiar el comportamiento de la granja a lo largo de su vida útil (25 años), implementando un modelo numérico de propagación de oleaje (Delft3D), y evaluando el recurso energético en términos de la energía de la ola, que depende de la altura de ola en los dispositivos.

Para el estudio, se ha calculado el recurso energético en cada dispositivo, así como diversos factores para hacer un análisis más en profundidad, tales como la correlación, el error medio cuadrático, el qfactor, la producción unitaria y parámetros relativos a la operación de las granjas. En el análisis realizado de los resultados obtenidos, se ha concluido que el parámetro fundamental para la eficiencia de los dispositivos es la separación entre los mismos, ya que las interacciones que se producen entre dispositivos son fundamentales para su funcionamiento.

Usando los resultados de este Trabajo Fin de Grado, además, se ha elaborado un artículo científico, pendiente de publicación en la revista Applied Energy.

Abstract

Over the last decades, several environmental problems have been produced by the use of fossil fuels, aggravating issues like global warming and climate change. This have made us to look for new energy sources that respect the environment, which are called renewable energies. However, that is not enough, because we still depend on fossil fuels, so we still have a lot to do.

Nevertheless, while solar, wind or conventional hydraulic energies have been thoroughly developed, others energies like sea energy are still in investigation stage. Oceans and seas are a huge energy source, and we only use a little proportion, so it is necessary to progress more in this kind of energies. This work focus on sea energy extraction, in detail in wave energy operation.

The aim of this work is to stablish a methodology for the optimization of a Wave Energy Converters (WECs) farm. This methodology will be applied to a practical case at the coast of Cadiz. For that, the behaviour of the farm will be analysed during its lifetime (25 years), using a wave propagation numeric model (Delft3D), and evaluating the energy resource in terms of wave energy, that depends on the wave height at the devices.

For the study, the energy resource has been calculated at each device, just like some factors for a deep study, like correlation, root mean square error, qfactor, unit production and parameters related to farm operation. To sum up, the main factor for the devices efficiency is the distance between devices, because the interactions that happen are fundamental for its working.

A paper has been made using the results of this Final Degree Work (To be submitted to Applied Energy).

Índice Abreviado

| | |
|---|-----------|
| <i>Resumen</i> | III |
| <i>Abstract</i> | V |
| <i>Índice Abreviado</i> | VII |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Avances realizados | 4 |
| 1.2. Avances necesarios | 4 |
| 1.3. Objetivos | 4 |
| 1.4. Estructura del documento | 5 |
| 2. Descripción del área de estudio | 7 |
| 2.1. Clima de oleaje | 7 |
| 2.2. Corrientes de marea | 10 |
| 2.3. Características de los sedimentos | 11 |
| 3. Metodología | 13 |
| 3.1. Downscaling de clima marítimo | 13 |
| 3.2. Modelo numérico | 14 |
| 3.3. Definición de las granjas | 17 |
| 3.4. Evaluación del recurso energético | 21 |
| 3.5. Estudio de las corrientes | 23 |
| 4. Análisis de resultados | 27 |
| 4.1. Producción energética | 27 |
| 4.2. Eficiencia e impacto ambiental | 38 |
| 4.3. Operatividad y mantenimiento | 39 |
| 4.4. Parámetros de diseño de los WECs | 42 |
| 4.5. Estudio de las corrientes | 47 |
| 5. Conclusiones y trabajo futuro | 51 |
| Apéndice A. Software WAVER | 53 |
| A.1. Requisitos | 53 |
| A.2. Funcionamiento de WAVER | 53 |
| Apéndice B. Compendio de figuras | 59 |

| | |
|--------------------------|-----|
| B.1. Energía | 59 |
| B.2. Mantenimiento | 77 |
| <i>Índice de Figuras</i> | 101 |
| <i>Bibliografía</i> | 105 |

Índice

| | |
|---|-----------|
| <i>Resumen</i> | III |
| <i>Abstract</i> | V |
| <i>Índice Abreviado</i> | VII |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Avances realizados | 4 |
| 1.2. Avances necesarios | 4 |
| 1.3. Objetivos | 4 |
| 1.4. Estructura del documento | 5 |
| 2. Descripción del área de estudio | 7 |
| 2.1. Clima de oleaje | 7 |
| 2.2. Corrientes de marea | 10 |
| 2.3. Características de los sedimentos | 11 |
| 3. Metodología | 13 |
| 3.1. Downscaling de clima marítimo | 13 |
| 3.2. Modelo numérico | 14 |
| 3.2.1. Ecuaciones de gobierno | 14 |
| Descripción espectral del oleaje | 15 |
| Propagación del oleaje | 16 |
| 3.3. Definición de las granjas | 17 |
| 3.3.1. Descripción de los dispositivos | 17 |
| 3.3.2. Configuración de las granjas | 18 |
| 3.4. Evaluación del recurso energético | 21 |
| 3.5. Estudio de las corrientes | 23 |
| 3.5.1. Descripción de Flow | 23 |
| Coordenada σ | 24 |
| Ecuación de continuidad | 25 |
| Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento | 25 |
| 3.5.2. Condiciones de contorno | 25 |
| 4. Análisis de resultados | 27 |
| 4.1. Producción energética | 27 |
| 4.1.1. Interacción entre dispositivos | 31 |
| Correlación | 32 |

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| | Error medio cuadrático | 33 |
| | Qfactor | 34 |
| 4.2. | Eficiencia e impacto ambiental | 38 |
| 4.3. | Operatividad y mantenimiento | 39 |
| 4.3.1. | Disponibilidad | 40 |
| 4.3.2. | Accesibilidad | 41 |
| 4.3.3. | Ventanas de tiempo | 42 |
| 4.4. | Parámetros de diseño de los WECs | 42 |
| 4.5. | Estudio de las corrientes | 47 |
| 4.5.1. | Energía | 47 |
| 4.5.2. | Corrientes | 47 |
| 5. | Conclusiones y trabajo futuro | 51 |
| Apéndice A. | Software WAVER | 53 |
| A.1. | Requisitos | 53 |
| A.2. | Funcionamiento de WAVER | 53 |
| A.2.1. | Energía | 54 |
| | Cálculo desde inserción manual | 54 |
| | Cálculo mediante inserción desde hoja de cálculo | 56 |
| A.2.2. | Accesibilidad | 57 |
| Apéndice B. | Compendio de figuras | 59 |
| B.1. | Energía | 59 |
| B.1.1. | Producción anual | 59 |
| | Producción estacional | 64 |
| B.1.2. | Producción y direccionalidad | 68 |
| B.1.3. | Direccionalidad y Qfactor | 73 |
| B.2. | Mantenimiento | 77 |
| | Disponibilidad | 77 |
| | Accesibilidad | 82 |
| | Tiempo medio de espera | 86 |
| | <i>Índice de Figuras</i> | 101 |
| | <i>Bibliografía</i> | 105 |

1 Introducción

En el último siglo, debido a los problemas medioambientales derivados de la extracción y la explotación de los combustibles fósiles, ha sido necesario un desarrollo cada vez mayor de las energías renovables. En la Unión Europea, a través de la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, se marcó un objetivo de un 20 % de participación de energías renovables en 2020, valor que algunos países ya han alcanzado, como Suecia, país líder en Europa en energías renovables, con una participación del 50 %. Sin embargo, muchos otros países aún están lejos de cumplir con la Directiva, como España, en el que estos objetivos se establecieron en el Plan de Energías Renovables 2011-2020. Si observamos la evolución de la participación de energías renovables en la Unión Europea (Figura 1.1), se observa que estamos cerca, pero aún queda mucho que avanzar.

Mientras que energías como la solar, hidráulica y eólica han alcanzado elevados niveles de desarrollo, la explotación energética del mar aún está en fase de desarrollo. Los mares contienen una ingente cantidad de energía por aprovechar. Según datos del IDAE¹, en 2010

¹ Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

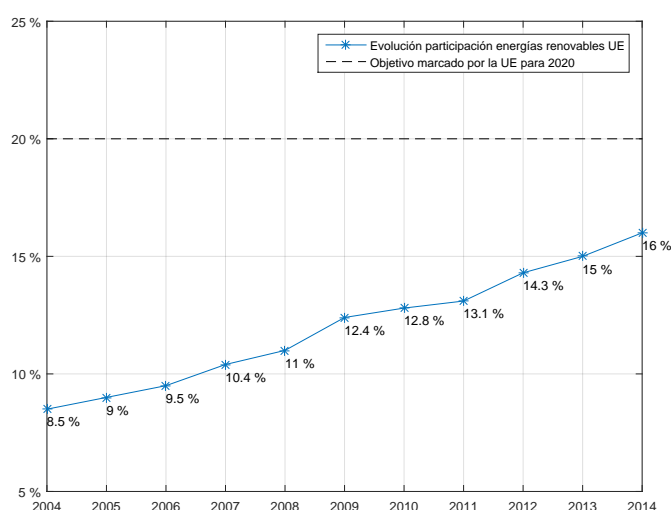


Figura 1.1 Evolución de la participación de las energías renovables en la UE.

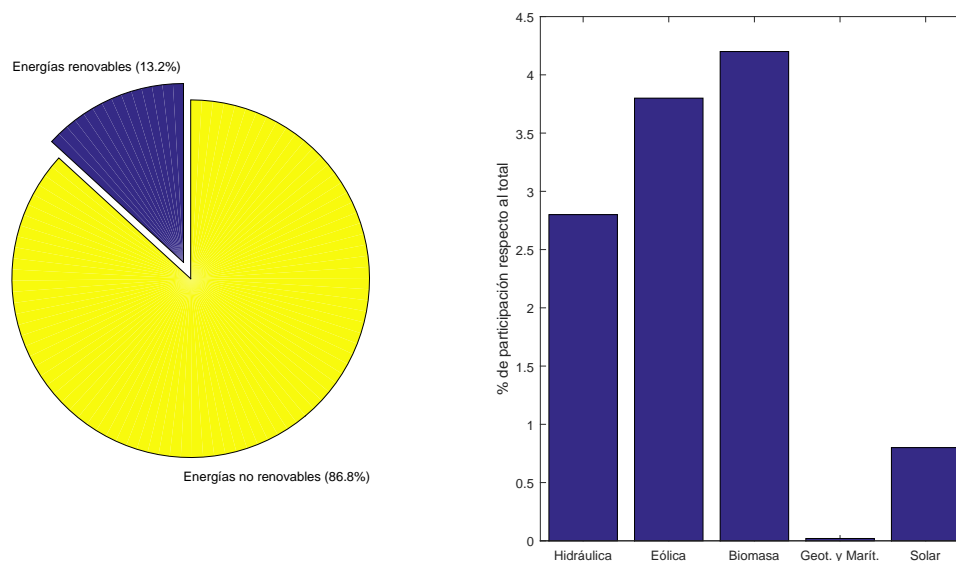


Figura 1.2 Participación de las energías renovables en España en 2010.

en España la participación de las energías renovables fue del 13.2 %, mientras que de la energía del mar en particular la participación fue inferior al 0.02 % (Figura 1.2). Por tanto, es necesario que en este país, que cuenta con cerca de 7902 km de costa, avancemos más en el desarrollo de este tipo de energías. España posee un importante potencial energético marino. Por las características de nuestra costa, el aprovechamiento de la energía de las olas es la que se vislumbra como la más prometedora. La energía de las corrientes, en el sur de la Península Ibérica, presenta también un elevado potencial teórico, pero su viabilidad está muy limitada por el intenso tráfico marítimo y los valores ambientales.

En cambio, en el mundo, la participación de la energía marítima en la producción de energía es menor, puesto que esta es igual al 0.03 %, pero con respecto al total de energías renovables (Figura 1.3) ².

En relación a este tema, otro dato interesante que podemos observar (Figura 1.4), es que mientras que la cantidad de agua dulce en la Tierra es prácticamente despreciable en comparación con las aguas oceánicas, la explotación energética de estas últimas es muy inferior a la de las aguas continentales, siendo evidente que aún queda mucho por descubrir en este ámbito.

El principal motivo de la escasa participación de este tipo de energías, es que el coste de generación es muy alto, estando fuera del rango comercial, y no son fiables debido a la inmadurez de la tecnología. Por tanto, es necesaria una mayor inversión en la investigación de este tipo de fuentes de energía, para poder reducir estos costes y aumentar su participación en la producción energética a medio-largo plazo. Según el Plan de Energías Renovables 2011-2020 se estima que la extracción de energía del mar empezará a ser competitiva

² Datos del reporte de la situación mundial de las energías renovables de REN21 (2015)

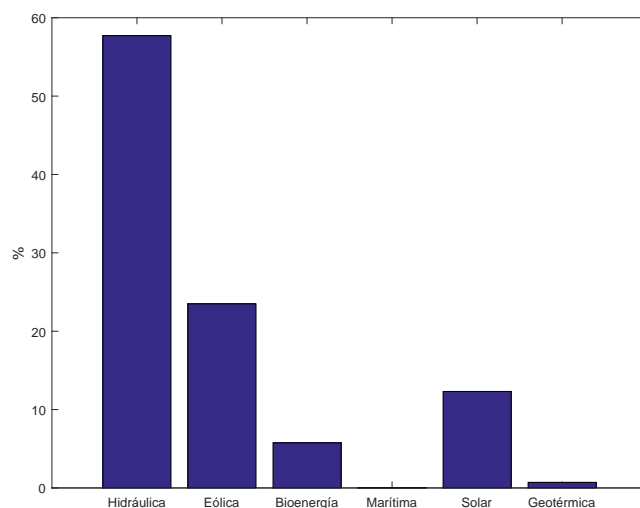


Figura 1.3 Participación de las distintas energías renovables en el panorama mundial en 2015.

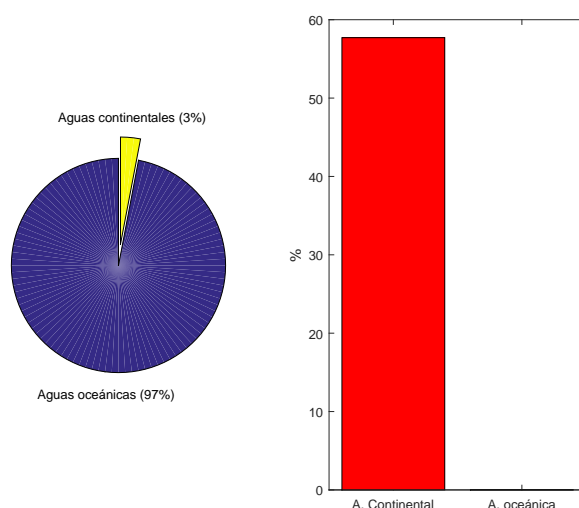


Figura 1.4 Distribución del agua en la Tierra y su participación en la producción de energía.

(según precios de mercado) a partir del año 2026.

Con respecto a la extracción de energía del mar se han desarrollado principalmente dos tecnologías:

- Tidal Energy Converters (TECs): Extracción de energía de las mareas[23]
- Wave Energy Converters(WECs): Extracción de energía del oleaje[18]

Este trabajo abordará específicamente la explotación de la energía del oleaje, mediante granjas de convertidores de energía del oleaje (Wave Energy Converters, WEC's). Para ello

será necesario realizar una evaluación de dicho recurso en diferentes áreas para encontrar localizaciones óptimas.

1.1 Avances realizados

En los últimos años se han diseñado una gran variedad de WEC's, principalmente sistemas de overtopping, sistemas de oscilación de cuerpo y sistemas de oscilación de columna de agua. Muchas de estas soluciones han sido ensayadas en laboratorio y se ha mejorado su diseño en relación a la eficiencia para diferentes condiciones de oleaje. [18]

Su colocación puede ser cercana o lejana a la costa, y sus dimensiones son variables. Además, para mejorar su rendimiento económico, estos dispositivos no se instalan de manera individual, sino que se colocan formando parte de un grupo de WEC's, llamados granjas.

Diversos estudios se han centrado en las interacciones entre configuraciones. Al principio, sólo se analizaron geometrías simples sometidas a un oleaje regular y unidireccional. [6][11]. Más tarde, se empezó a estudiar la influencia de la separación entre dispositivos [1]. A mayor separación de WECs habrá una menor reducción de altura de ola, y por tanto mayor producción energética. También se han desarrollado estudios sobre la interacción entre dispositivos en granjas de 9 a 25 WECs con una escala anual [4], aparte de evaluar configuraciones óptimas para diferentes estados de mar, en términos de producción energética [9]. Por otro lado, se han analizado granjas en términos de minimizar la variación de energía [10][13]. Más recientemente, se han evaluado distintas geometrías de granjas en la costa italiana usando combinaciones reales de estados de mar[5].

1.2 Avances necesarios

Sin embargo, aún es necesario avanzar en el conocimiento del comportamiento de las diferentes geometrías para series de tiempo que abarquen el ciclo de vida de los dispositivos, pues sólo se han obtenido resultados para ciertas combinaciones de estados de mar. Además, la predicción del funcionamiento de los dispositivos durante su vida útil sólo ha sido estudiada para WECs individuales [18], sin considerar la interacción entre dispositivos, algo fundamental a la hora de evaluar la producción de la granja.

Tampoco se han realizado estudios de las granjas teniendo en cuenta la influencia de las corrientes, tanto en su producción energética, debido a que la propagación del oleaje puede variar con ellas, así como su mantenimiento, debido a un posible aumento de la velocidad debido a la presencia de obstáculos, dificultando la navegabilidad. Además, esas corrientes también pueden afectar a la morfodinámica, alterando el transporte de sedimentos, por lo que habría que evaluar su impacto.

1.3 Objetivos

El objetivo general del trabajo es establecer una metodología para la optimización de la configuración de una granja de convertidores de energía del oleaje (WECs). Esta metodología se aplicará a un caso práctico en la costa de Cádiz. Para ello se realizará:

- Definición de la geometría de las granjas. Se definirán 9 configuraciones distintas formadas por 9 dispositivos
- Implementar un modelo numérico de propagación de oleaje
- Evaluar la energía potencialmente extraíble durante la vida útil del dispositivo, para lo cual se analizarán series de 25 años de clima marítimo
- Evaluar la eficiencia de cada configuración de granja desde diferentes ángulos:
 - Producción energética
 - Impacto medioambiental (en términos de superficie ocupada)
 - Aspectos relativos al mantenimiento y explotación de la granja
- Evaluación del recurso energético teniendo en cuenta la influencia de las corrientes y mareas

Mediante esta evaluación se proporcionarán las herramientas necesarias al posible promotor de la granja para escoger una configuración óptima teniendo en cuenta varios enfoques, tales como económicos, medioambientales u operativos. La evaluación de qué aspecto es más importante no entra dentro de los objetivos de este trabajo.

1.4 Estructura del documento

A lo largo del documento, en el capítulo 2 se realizará una descripción del área donde se colocarán las granjas, evaluando la potencialidad energética del área. Posteriormente, en el capítulo 3 se realizará una explicación de la metodología empleada, donde se describirá el modelo numérico empleado, así como las ecuaciones que se encuentran detrás del mismo; se describirán las distintas configuraciones de granjas que se han adoptado; la enumeración de las ecuaciones necesarias para evaluar el recurso energético. En el capítulo 4, se hará un análisis de los resultados obtenidos, calculando diversos factores que nos permitan evaluar la granja en los términos antes descritos. Luego, se va a realizar un análisis de la influencia de las corrientes, que no se han tenido en cuenta en los apartados anteriores, para un único estado de mar, dado el enorme gasto computacional que representa. Al final, en el capítulo 5 se expondrán las conclusiones extraídas del trabajo.

2 Descripción del área de estudio

Como ya se ha comentado, el estudio se realizará en un área de la costa de Cádiz (Figura 2.1). Esta zona es óptima para la localización de los dispositivos debido a su gran plataforma continental (30 km) y relativas bajas profundidades, con el talud continental a una profundidad de aproximadamente 120 m, y a que es una zona de alto potencial energético[25]. La plataforma tiene una baja pendiente media, del orden de 1.5° . Estas características permiten la explotación del recurso energético de acuerdo con el protocolo de Kyoto y la política energética de la Unión Europea y España [2]. Esta región se caracteriza por un lecho arenoso y incluso en la zona sur aparecen varios afloramientos rocosos. Además, la región está sujeta al crecimiento y la migración de periódicas formas de fondo, especialmente en la parte sur de la plataforma continental, conocidas como olas de arena [17].

Los dispositivos se colocarán a una profundidad aproximada de 35 m, a unos 10 km de la costa, cerca del cabo de Trafalgar, minimizando así el impacto ambiental y facilitando la explotación (Figura 2.2). Además, están en una zona donde la batimetría es más o menos plana, con poca diferencia de profundidad entre dispositivos, logrando así una mayor homogeneidad en los resultados (Figura 2.3).

2.1 Clima de oleaje

Para estudiar las tendencias del oleaje, se han utilizado los datos históricos de los puntos SIMAR de Puertos del Estado, más en concreto el SIMAR 5034009. El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza. Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR-44 y WANA. El conjunto SIMAR ofrece datos de oleaje con frecuencia horaria desde el año 1958 hasta la actualidad y están disponibles tanto en el Mar Mediterráneo como en el Océano Atlántico, en aguas abiertas como en costa, llegando a ofrecer datos a escala portuaria (Figura 2.4). Esos puntos proveen datos sobre:

- Hm0: Altura significativa espectral
- Tm02: Período medio espectral momentos 0 y 2



Figura 2.1 Área de estudio.

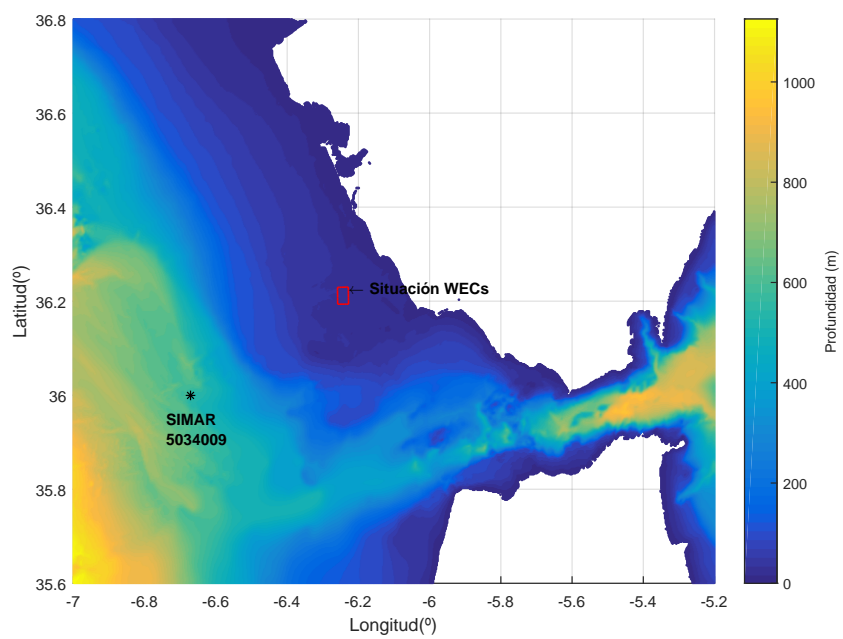


Figura 2.2 Situación de la granja de dispositivos.

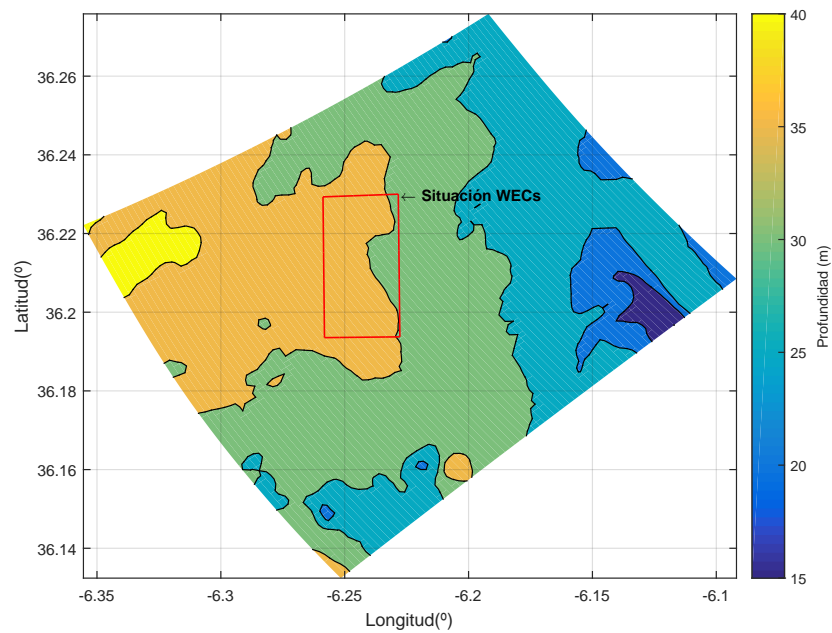


Figura 2.3 Batimetría de la zona cercana a la granja.

- T_p : Período de pico
- $DirM$: Dirección media de procedencia de oleaje (0° N, 90° E)
- $Hm0V$: Mar de viento: Altura Significante Espectral
- $DirMV$: Mar de Viento: Dirección Media de procedencia
- $Hm0F1$: Mar de Fondo 1: Altura Significante Espectral
- $Tm02F1$: Mar de Fondo 1: Periodo Medio Espectral
- $DirMF1$: Mar de Fondo 1: Dirección Media de procedencia
- $Hm0F2$: Mar de Fondo 2: $Hm0$
- $Tm02F2$: Mar de Fondo 2: Periodo Medio Espectral
- $DirMF2$: Mar de Fondo 2: Dirección Media de procedencia
- $VelV$: Velocidad Media del Viento
- $DirV$: Dirección Media de procedencia del Viento

De estos datos se obtiene que la dirección dominante de oleaje está en el rango W-NW (Figura 2.5).

Para estudiar el oleaje en la zona, se ha calculado la función de distribución de Rayleigh (Figura 2.6) para los datos de oleaje del SIMAR 5034009, tanto la función de distribución

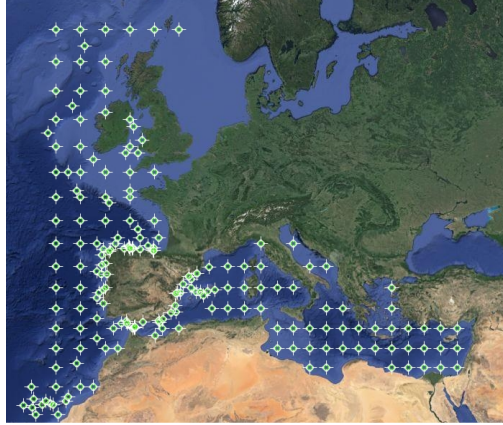


Figura 2.4 Puntos SIMAR de Puertos del Estado. *Fuente: Puertos del Estado.*

normal (Ecuación 2.1) como la acumulada (Ecuación 2.3).

$$p(H) = \frac{2 * H}{H_{rms}^2} * e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad (2.1)$$

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_1^N H_i^2} \quad (2.2)$$

$$Prob(H' < H) = 1 - e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad (2.3)$$

La altura del oleaje, en condiciones normales, es menor de los 2.5-3 m, mientras que durante las condiciones extremas de clima, las alturas de ola normalmente exceden los 3.5 m. La altura de ola correspondiente al 99 percentil (aquella que sólo será superada un 1 % de las veces), es igual a 4 m.

En cuanto a la energía del oleaje, la mayor energía acumulada proviene del rango W-NW (Figura 2.8), que como ya se ha visto es la dirección dominante en el punto donde se ha estudiado el clima.

2.2 Corrientes de marea

La marea astronómica es semidiurna lunar con una amplitud media de 1 m y carreras de marea entre 1.2 y 3.8 m [22]. Según [2], el rango de valores extremos de la velocidad de marea es del orden de 1 m/seg. Además, la velocidad es principalmente horizontal con una componente norte sur mucho mayor que la componente este oeste alrededor de un orden de magnitud.

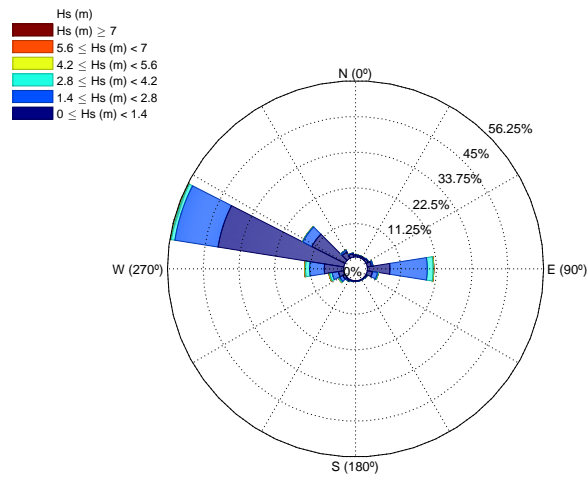


Figura 2.5 Rosa de oleaje del SIMAR 5034009.

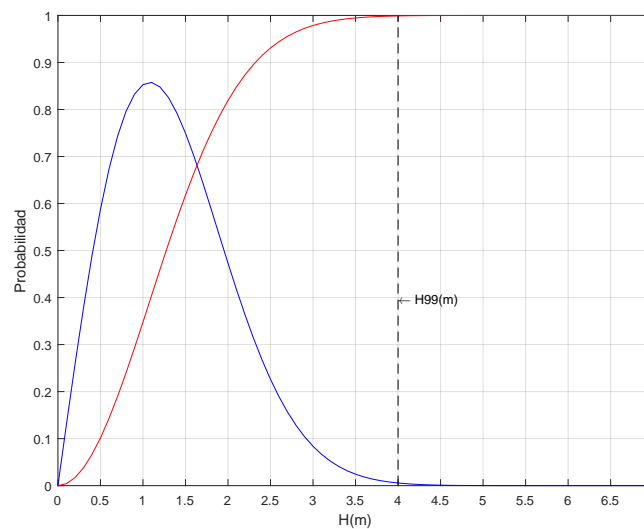


Figura 2.6 Distribución de Rayleigh del oleaje SIMAR 5034009.

2.3 Características de los sedimentos

[2] El tamaño de los sedimentos en la zona cercana a la costa de Trafalgar se compone de un alto porcentaje de arena fina. Del norte al sur, el tamaño medio de la arena se incrementa hacia Trafalgar, debido a la erosión de los acantilados. Es aquí donde se encuentra la mayor cantidad de arena de tamaño medio (más de 0.5 mm). En la plataforma de Trafalgar, la mayoría de la arena gruesa se encuentra en las áreas más profundas, mientras que la arena fina se distribuye sobre las dunas y bajo los escarpes. Desde el Cabo de Trafalgar, el tamaño medio decrece y se encuentra arena fina. Hacia el Este, moviéndonos hacia Gibraltar, el tamaño medio de grano tiende a incrementarse.

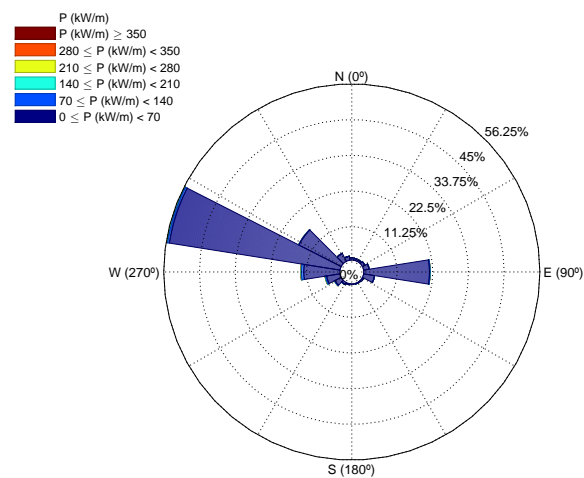


Figura 2.7 Rosa de potencias SIMAR 5034009.

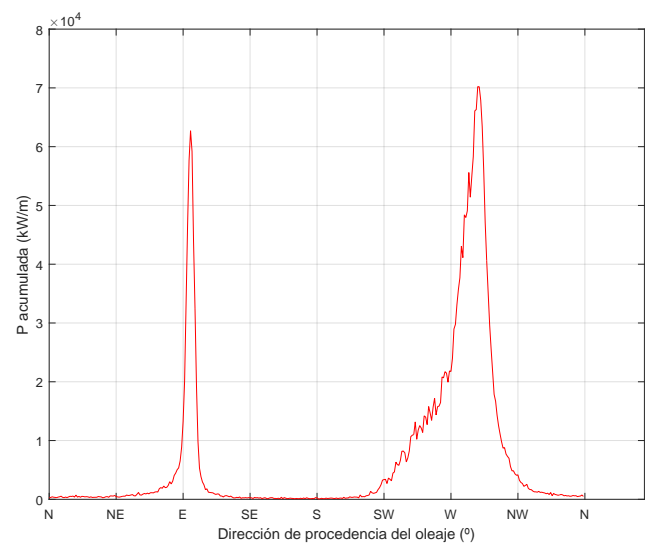


Figura 2.8 Energía acumulada para cada dirección SIMAR 5034009.

3 Metodología

A lo largo de este capítulo se va a realizar una descripción de la metodología seguida para la realización del trabajo, así como de las ecuaciones con las que se evaluará el recurso energético.

3.1 Downscaling de clima marítimo

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento de los dispositivos durante su vida útil, que se considera igual a 25 años[20]. Para el análisis se han utilizado datos del SIMAR 5034009 (Figura 2.2), que tiene datos históricos de estados de mar con frecuencia horaria desde 1958, de los últimos 25 años (Noviembre 1991- Noviembre 2016), por lo que tendremos resultados para unos 219 000 estados de mar. Sin embargo, dado que correr tal cantidad de estados de mar tendría un coste computacional demasiado elevado, se va a simular una base de datos representativa, que incluye tanto regímenes medios y extremos, de 300 estados de mar, generada mediante la metodología de Downscaling, y se interpolará posteriormente para obtener resultados para la serie de 25 años.

Esta metodología utiliza el algoritmo de máxima disimilitud (MDA) [15], cuyo objetivo es seleccionar un número M de datos representativos de una base de datos de N datos. La selección comienza inicializando el subconjunto transfiriendo un vector inicial de la base de datos. Este vector inicial es el que tenga la mayor suma de disimilitudes relativas a los otros dentro de la base de datos. El resto de los $M-1$ elementos se seleccionan de manera iterativa, calculando la disimilitud entre cada dato restante en la base de datos y los elementos del subconjunto y transfiriendo el más disimilar al subconjunto. El proceso acaba cuando el algoritmo alcanza M iteraciones. Por ejemplo, si el subconjunto está formado por R vectores ($R \leq M$), la disimilitud entre el vector i de la base de datos $N-R$ y el vector j perteneciente al subconjunto R se calcula como:

$$d_{ij} = ||x_i - v_j|| \quad i = 1, \dots, N-R \quad j = 1, \dots, R \quad (3.1)$$

Por tanto, la disimilitud entre el vector i y el subconjunto R se calcula como:

$$d_{i,sub} = \min(||x_i - v_j||) \quad i = 1 \dots N-R \quad j = 1 \dots R \quad (3.2)$$

Una vez que se han calculado las $N-R$ disimilitudes, el siguiente dato seleccionada es el que tenga mayor valor de $d_{i,sub}$. [7]

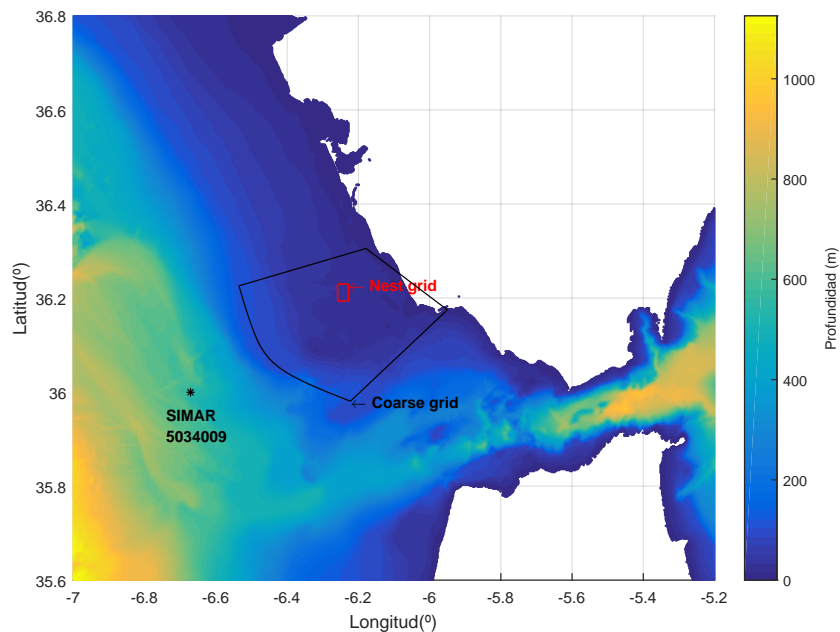


Figura 3.1 Grids modelo numérico.

3.2 Modelo numérico

Para la evaluación del recurso energético de las granjas se utilizará el modelo numérico Delft 3D, más concretamente el módulo Wave. Dicho modelo simula la propagación espectral de oleaje en superficies oceánicas y costeras mediante la resolución de la ecuación de acción de onda (Ecuación 3.18).

Además, el modelo es capaz de simular los principales procesos de propagación de oleaje (refracción, asomeramiento, difracción, rotura) y los efectos de la presencia de obstáculos. Los obstáculos deben tener al menos una longitud de malla en cada dirección para ser capaces de modificar las condiciones del oleaje. Cada WEC será modelado individualmente como un obstáculo para simular el efecto de su presencia en la propagación del oleaje.

El modelo se va a simular en una malla gruesa (coarse), de 171x171 celdas, y otra más fina (nest), anidada en la anterior, de 245x245 celdas (Figura 3.1). Así, optimizamos el coste computacional, ya que con la malla gruesa podemos tener resultados de la propagación del oleaje en la zona, pero sin embargo para obtener la altura de ola en los dispositivos los resultados en esta malla son muy imprecisos, dado que el tamaño de las celdas es muy grande, por lo que para esto último usaremos los resultados generados por la malla anidada, con un tamaño de celda mucho más pequeño.

3.2.1 Ecuaciones de gobierno

En este apartado se va a hacer una descripción de las ecuaciones de gobierno que utiliza el modelo numérico para simular la propagación de oleaje.¹

¹ Fuente: Manual de SWAN

Descripción espectral del oleaje

Debido a la irregular naturaleza del viento, la superficie del mar está continuamente variando, por lo que una descripción determinista de la misma no es posible. La elevación de la superficie del mar, en cualquier lugar y tiempo, puede verse como la suma de un número infinito de olas armónicas, donde cada una de ellas ha sido generada independientemente en diferentes tiempo y lugar. Debido a ello, la elevación de la superficie del mar puede describirse como (Ecuación 3.3)

$$\eta(t) = \sum_i a_i \cos(\sigma_i t + \alpha_i) \quad (3.3)$$

donde η es la elevación de la superficie del mar, a_i la amplitud, σ_i la frecuencia relativa y α_i la fase. Este es el modelo de fase aleatoria. Para oleaje lineal, la frecuencia relativa se rige por la ecuación

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (3.4)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, d la profundidad y k es el número de onda.

El oleaje es irregular por naturaleza, por lo que una descripción en el dominio del tiempo está muy limitada. Por ello, se ha descrito con la varianza de la densidad espectral, que es la transformada de Fourier de la función de autocovarianza de la superficie del mar.

$$S'(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (3.5)$$

$$C(\tau) = \langle \eta(t) \eta(t + \tau) \rangle \quad (3.6)$$

donde $C(\tau)$ es la función de autocovarianza, $\langle \rangle$ representa la expectación matemática de una variable aleatoria, y $\eta(t)$, $\eta(t + \tau)$, representa dos estados aleatorios de la superficie del mar.

En teoría de oleaje, se define otro espectro ligeramente diferente al anterior

$$S(f) = 2 * S'(f) \quad \text{para } f \geq 0 \quad \text{y} \quad S(f) = 0 \quad \text{para } f < 0 \quad (3.7)$$

La varianza $\langle \eta^2 \rangle$ es proporcional a la energía total E_{total} de las olas por unidad de área:

$$E_{total} = \frac{1}{2} \rho_w g \langle \eta^2 \rangle \quad (3.8)$$

Sin embargo, definir la densidad espectral únicamente en función de la frecuencia no es suficiente. Es necesario definirla también en función de la dirección del oleaje. Este espectro, que distribuye la energía del oleaje en frecuencia y dirección, se define como $S(f, \theta)$, y

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \quad (3.9)$$

Por tanto, basándonos en el espectro de oleaje, los parámetros del mismo pueden ser obtenidos. Estos pueden expresarse en términos del momento de orden i de la densidad espectral.

$$m_i = \int_0^\infty f^i S(f) df \quad (3.10)$$

La varianza de la superficie del mar se define como $m_0 = \langle \eta^2 \rangle$. Un parámetro fundamental es la altura significativa del oleaje, la utilizada como la representativa del estado de mar, y se define como

$$H_s = 4 * \sqrt{m_0} \quad (3.11)$$

También se definen varios períodos de ola:

$$T_{m01} = \frac{m_0}{m_1}, \quad T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}, \quad T_{m-10} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (3.12)$$

Estos parámetros serán los que nos devolverá el modelo numérico y algunos de ellos los usaremos posteriormente para evaluar el recurso energético (Sección 3.4).

Propagación del oleaje

Según la teoría lineal del oleaje, la velocidad de propagación en el espacio puede ser obtenida según:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = (c_x, c_y) = \vec{c}_g + \vec{u} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2|\vec{k}|}{\sinh(2|\vec{k}|d)} \right) \frac{\sigma \vec{k}}{|\vec{k}|^2} + \vec{u} \quad (3.13)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = c_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right) - c_g \vec{k} \frac{\partial \vec{u}}{\partial s} \quad (3.14)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = c_\theta = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial m} \right) \quad (3.15)$$

Donde c_x, c_y son las velocidades de propagación de la energía del oleaje en el espacio xy , c_θ y c_σ son las velocidades de propagación en el espacio espectral σ y θ , d es la profundidad del agua, s es la coordenada espacial en la dirección de propagación del oleaje (θ) y m es una coordenada perpendicular a s .

Además,

$$\vec{k} = (k_x, k_y) = (|\vec{k}| \cos \theta, |\vec{k}| \sin \theta), \quad \vec{u} = (u_x, u_y) \quad (3.16)$$

y el operador d/dt denota la derivada total a lo largo del camino espacial de la propagación de la energía, y se define como:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{c}_g + \vec{u}) \cdot \nabla_{\vec{x}} \quad (3.17)$$

Toda la información sobre la superficie del mar está contenida en la varianza de la densidad espectral $S(\sigma, \theta)$, distribuyendo la energía del oleaje entre las frecuencias σ y las direcciones de propagación θ (la dirección normal a la cresta de ola de cada componente espectral).

Normalmente, los modelos de oleaje determinan la evolución de la acción de onda $N(\vec{x}, t; \sigma, \theta)$ en el espacio x y el tiempo t . La densidad de acción se define como $N = S/\sigma$ y se conserva durante la propagación, mientras que la densidad espectral S no. El modelo numérico, para calcular la propagación del oleaje, utiliza la ecuación de acción de onda, que es [21][16]

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (3.18)$$

donde el lado izquierdo es la parte cinemática de la ecuación. El segundo término denota la propagación de la energía del oleaje en el espacio, con la velocidad de grupo $\vec{c}_g = \frac{\partial \sigma}{\partial \vec{k}}$ donde σ se obtiene de la ecuación de la dispersión (Ecuación 3.4), y k es el número de onda. El tercer término representa el efecto del cambio de la frecuencia debido a las variaciones de la profundidad, y el cuarto término representa la refracción. Las variables c_{σ} y c_{θ} son las velocidades de propagación en el espacio espectral (σ, θ) . El lado derecho de la ecuación contiene S_{tot} , que es el término que representa todos los procesos físicos que generan, disipan o redistribuyen energía del oleaje, y están definidos por la densidad energética $S(\sigma, \theta)$. Varios procesos contribuyen a S_{tot} :

- Transferencia de energía del viento al oleaje
- Resonancia por la variación de la presión del viento sobre el oleaje
- Fluctuaciones de la presión de la ola
- Disipación, que se representa por la suma de tres contribuciones: fricción, rotura por el fondo y whitecapping.
- Interacciones no lineales

3.3 Definición de las granjas

3.3.1 Descripción de los dispositivos

En este trabajo se van a utilizar dispositivos de overtopping, los cuales utilizan una placa en pendiente que conduce a las olas dentro de un depósito localizado justo detrás de la misma. La energía se produce mediante unas turbinas, debido a la diferencia de nivel entre el mar y el depósito [26]. Específicamente, la metodología se aplicará para el prototipo WaveCat [12] (Figura 3.2). Este modelo es orientable respecto a la dirección del oleaje entrante, por lo que el punto en el que obtendremos resultados del modelo numérico para evaluar el recurso energético, dependerá de la dirección del oleaje incidente. Por ello, para su inclusión en el modelo numérico, los dispositivos se modelarán como un círculo con un diámetro D igual a 100 m, que es la anchura de la abertura por donde entra el oleaje, considerando de esta manera en el modelo el giro de los WECs.

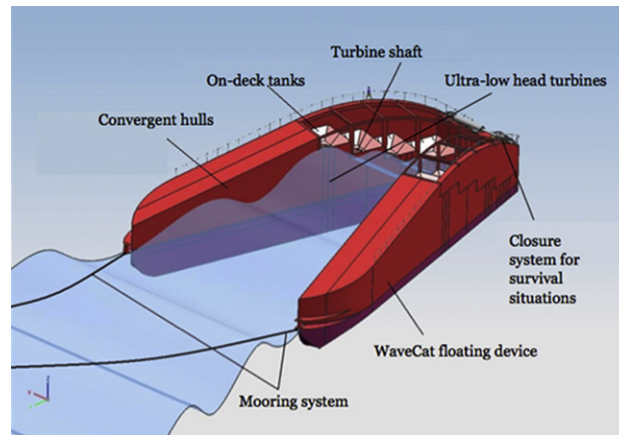


Figura 3.2 Modelo WaveCat. *Fuente: [12].*

Para la obtención de resultados del modelo, se han creado ocho puntos de control para cada dispositivo, dividiéndolo así en ocho sectores hacia los que se orientaría el dispositivo en función del oleaje incidente (Figura 3.3). Así, el software empleado devuelve el resultado de la altura de ola en dichos 8 puntos, por lo que después habrá que seleccionar el resultado en el punto de control deseado, que será el de aquel sector por el que entre el oleaje.

En ensayos de laboratorio se determinaron los siguientes coeficientes para el prototipo WaveCat [12]:

- Coeficiente de transmisión: 0.75
- Coeficiente de reflexión: 0.44

El coeficiente de transmisión (k_t) determina la reducción de altura de ola (H) que se produce al pasar ésta por el dispositivo ($H^* = k_t * H$), mientras que el coeficiente de reflexión (k_r), determina la altura de ola reflejada tras su paso por el dispositivo ($H_r = k_r * H$).

3.3.2 Configuración de las granjas

Como ya se ha mencionado en la sección 1.3, se van a definir 9 configuraciones distintas de granjas, cada una de ellas compuesta por 9 dispositivos. Dentro de esas 9 configuraciones, se realizarán 3 geometrías distintas, y cada geometría se definirá con 3 separaciones entre los centros de los WECs (S). Estas distancias serán 2, 4 y 6 veces el diámetro de los mismos.

A la hora de definir las geometrías se va a tener en cuenta la interacción entre dispositivos para maximizar la energía producida. Como esta depende de la altura de ola, habrá que evitar que muchos dispositivos se encuentren en las zonas de sombra de otros, de tal manera que la altura de ola en ellos no sea muy pequeña. Para ello hay que jugar con la separación y con la geometría.

Las tres geometrías a evaluar son las siguientes:

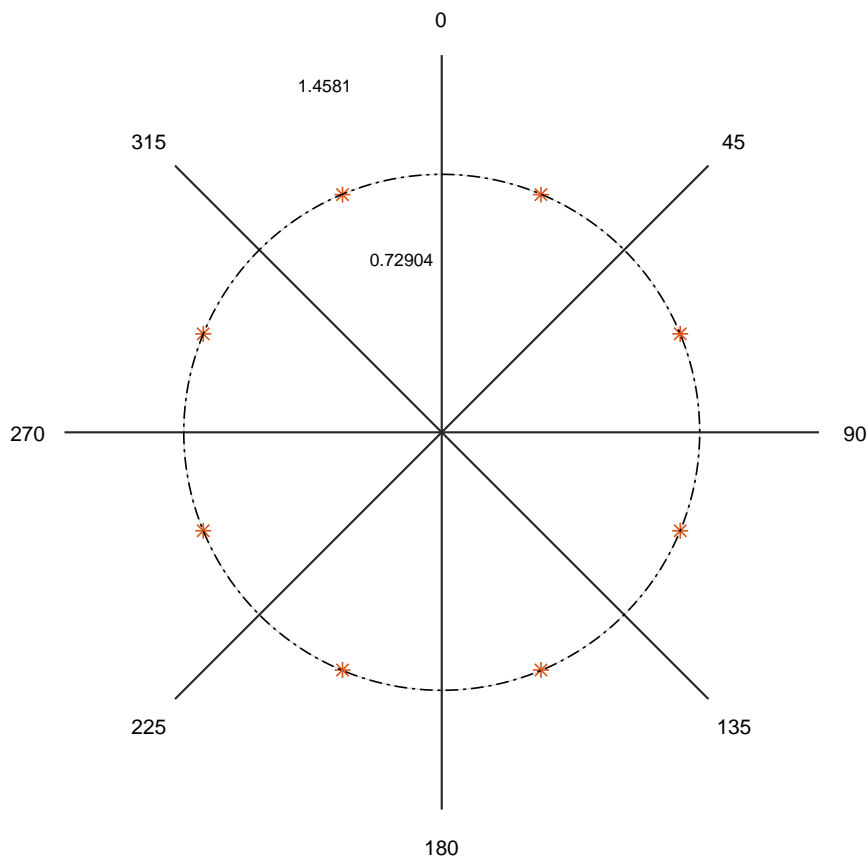


Figura 3.3 División en sectores de la modelización del dispositivo.

- Distribución cuadrada (alineada)²(Figura 3.4). La separación horizontal y vertical entre los centros de los dispositivos será S .

Con esta configuración se pretende una mayor versatilidad en cuanto a la variación de la dirección del oleaje, al ser una distribución bisimétrica.

- Distribución desalineada³(Figura 3.5). Similar a la distribución cuadrada pero con la columna central de dispositivos desplazada hacia arriba una longitud $S/2$.

Con esta configuración se pretende evitar que los dispositivos queden en las zonas de sombra de los demás, dado que la columna central se encuentra en el hueco que dejan los dispositivos de la columna delantera (1-4-7), mientras que los de la trasera, aunque están en el mismo eje horizontal que los de la fila delantera, la separación es suficiente para que le afecte lo mínimo posible.

² A lo largo del documento se corresponderá con el acrónimo align

³ A lo largo del documento se corresponderá con el acrónimo desal

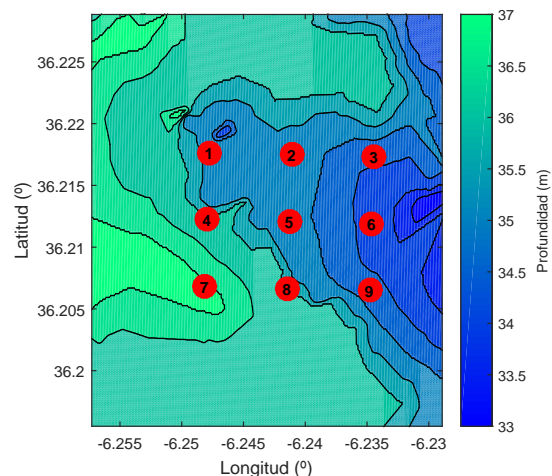


Figura 3.4 Distribución alineada.

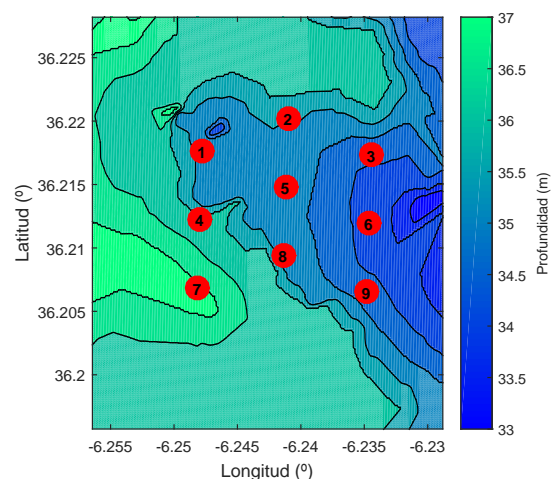


Figura 3.5 Distribución desalineada.

- Distribución trapezoidal⁴(Figura 3.6). La separación horizontal y vertical entre los centros de los dispositivos será S .

Con esta configuración, se consigue que haya un mayor número de dispositivos enfrentados a la altura máxima (los cuatro de la columna delantera), mientras que al colocar los WECs de las columnas traseras entre los huecos de las delanteras, se consigue evitar que éstos queden en las zonas de sombra. Al dejar sólo dos dispositivos en la última fila, que es a la que llegará una altura de ola menor, se minimiza la pérdida de energía. Además, los de la última columna, a pesar de estar en el mismo eje que los de la primera, están lo suficientemente alejados como para no estar dentro de su zona de sombra. Para una mayor producción, el lado mayor se ha orientado hacia la dirección con mayor potencial energético (W) (Figura 2.8).

⁴ A lo largo del documento se corresponderá con el acrónimo trap

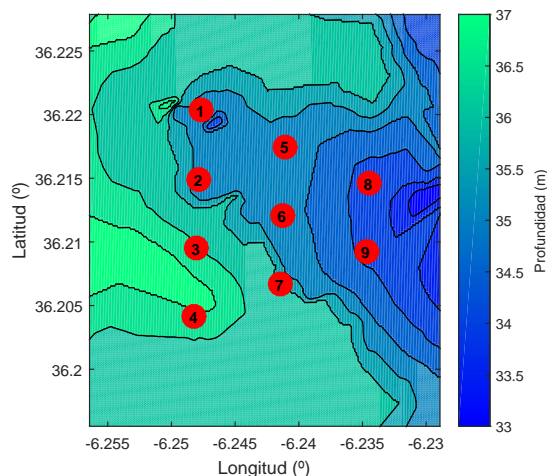


Figura 3.6 Distribución trapezoidal.

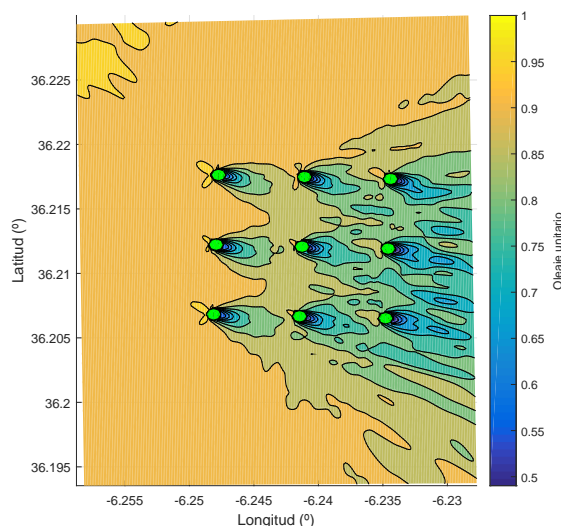


Figura 3.7 Propagación oleaje unitario distribución alineada.

En las figuras 3.7 a 3.9 se muestra un ejemplo del comportamiento de las granjas para una altura de ola igual a la unidad. Se observa que, efectivamente, en la distribución desalineada obtenemos mayor altura de ola que en la alineada debido a ese retranqueo de la columna central, quedando así los dispositivos alejados de las distintas zonas de sombra, mientras que en la trapezoidal ocurre lo que ya se ha comentado sobre la interacción entre WECs. Esto es equivalente al coeficiente de propagación.

3.4 Evaluación del recurso energético

El recurso energético se evalúa calculando la energía del oleaje, que será la que se transforme en energía eléctrica, con un cierto rendimiento de los dispositivos, que a efectos de este estudio no se ha tenido en cuenta. Sus unidades son de potencia por unidad de longitud de

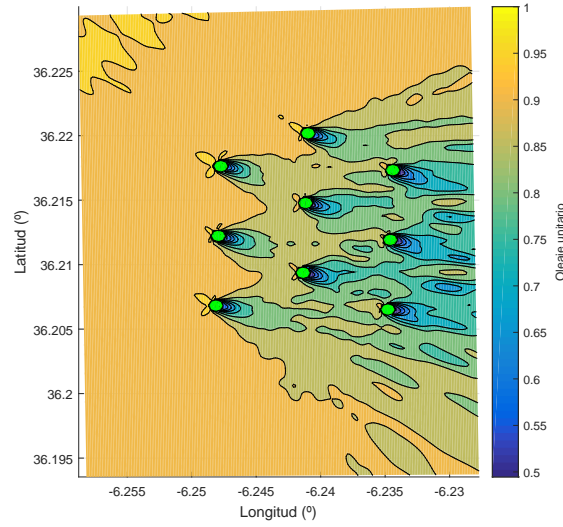


Figura 3.8 Propagación oleaje unitario distribución desalineada.

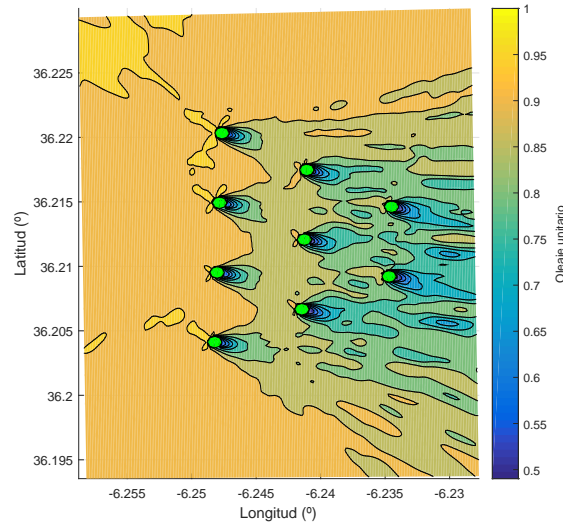


Figura 3.9 Propagación oleaje unitario distribución trapezoidal.

cresta de ola (P , en kW/m) (Ecuación 3.19).

$$P = \rho * g * \int_0^{2\pi} \int_0^\infty S(f, \theta) * C_g(f, h) df d\theta \quad (3.19)$$

Donde ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad, $S(f, \theta)$ es el espectro de oleaje, f es la frecuencia, θ es la dirección de propagación del componente espectral, C_g es la celeridad de grupo y h la profundidad del agua. Esta ecuación se puede aproximar por [3]:

$$P = \frac{1}{16} * \rho * g * H_{m0}^2 * C_g \quad (3.20)$$

$$C_g = \frac{C}{2} * \left(1 + \frac{2 * k * h}{\sinh(2 * k * h)} \right) \quad (3.21)$$

$$C = \frac{\sigma}{k} \quad (3.22)$$

Donde H_{m0} es la altura de ola espectral evaluada del espectro de oleaje, cuyos momentos espectrales están definidos como (Ecuación 3.23).

$$m_i = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) * f^i df d\theta \quad (3.23)$$

Así, $H_{m0} = 4 * \sqrt{m_0}$, y el período usado para calcular C_g es $T_{m-1,0}$ [3].

Además, σ se obtiene de la ecuación 3.26, mientras que H_{m0} y T son resultados obtenidos del modelo numérico para cada dispositivo. El valor k se obtiene de la ecuación de la dispersión (Ecuación 3.24).

$$\sigma^2 = g * k * \tanh(k * h) \quad (3.24)$$

Donde:

$$k = \frac{2 * \pi}{L} \quad \text{L: Longitud de onda} \quad (3.25)$$

$$\sigma = \frac{2 * \pi}{T} \quad \text{T: Período} \quad (3.26)$$

Así, una vez hechos todos estos cálculos, se obtiene el recurso energético en cada dispositivo, para la base de datos de 300 estados de mar. Como necesitamos resultados durante toda la vida útil de la granja, 25 años, se obtiene P para una serie histórica de estados de mar (cada hora) de los últimos 25 años, interpolando a partir de la base de datos de 300.

3.5 Estudio de las corrientes

Debido al elevado coste computacional, se ha calculado la propagación del oleaje sin tener en cuenta el efecto de las corrientes producidas por las mareas. Por ello, una vez que se haya evaluado el recurso energético durante la vida útil de los dispositivos, y calculado todos los parámetros necesarios para el análisis de la granja, se va a implementar un modelo numérico que tenga en cuenta el efecto de las corrientes en la propagación de oleaje. Este modelo es el módulo Flow de Delft3D, que se puede correr conjuntamente con Wave, teniendo en cuenta el modelo la influencia del oleaje sobre las corrientes y viceversa. Esto se va a hacer para 2 estados de mar de condiciones medias para cada dirección dominante (Figura 2.8), y se compararán con los resultados obtenidos anteriormente, evaluando si el no haber tenido esto en cuenta en el estudio del comportamiento de la granja induce a errores grandes, o por el contrario estaríamos del lado de la seguridad.

3.5.1 Descripción de Flow

El módulo Flow puede trabajar con información de flujo, calidad del agua, transporte de sedimentos, morfología, velocidad del viento, temperatura, mareas, salinidad, etc. Delft 3D Flow resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para un fluido incompresible, para una

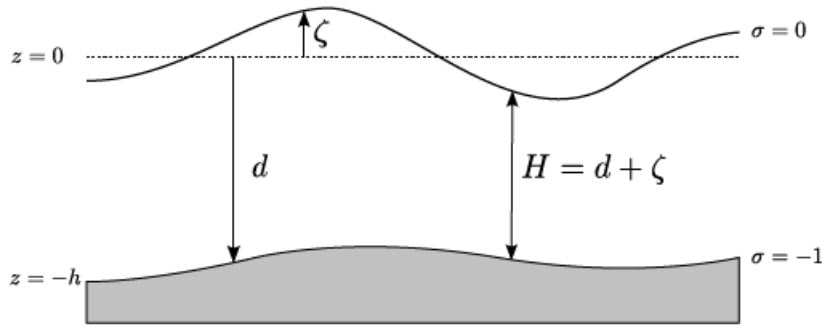


Figura 3.10 Definición de la coordenada σ . Fuente: *Manual de Delft3D-Flow*.

hipótesis de aguas someras⁵. En la dirección horizontal Flow usa coordenadas curvilíneas ortogonales. Dos sistemas de coordenadas son soportados:

- Coordenadas cartesianas (χ, η)
- Coordenadas esféricas (λ, ϕ)

Las coordenadas esféricas son un caso especial de coordenadas curvilíneas ortogonales con:

$$\xi = \lambda \quad (3.27)$$

$$\eta = \phi \quad (3.28)$$

$$\sqrt{G_{\xi\xi}} = R \cos \phi \quad (3.29)$$

$$\sqrt{G_{\eta\eta}} = R \quad (3.30)$$

En cuanto a la dirección vertical, se soportan dos coordenadas verticales diferentes:

- Coordenada σ [24]
- Coordenada cartesiana Z

Coordenada σ

La coordenada σ (Figura 3.10) fue introducida para modelos atmosféricos[24]. Esta se define como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (3.31)$$

Donde z es la coordenada vertical en el espacio; ζ es la elevación de la superficie libre sobre el plano de referencia $z = 0$; d es la profundidad por debajo del plano de referencia; y H es la profundidad total del agua, $d + \zeta$.

⁵ Fuente: Manual de Delft3D-Flow

Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad se deriva de la integración de la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles sobre la profundidad total:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = (d+\zeta)Q \quad (3.32)$$

Donde U y V son las velocidades medias a lo largo de la profundidad:

$$U = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\eta u dz = \int_{-1}^0 u d\sigma \quad (3.33)$$

$$V = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\eta v dz = \int_{-1}^0 v d\sigma \quad (3.34)$$

y Q representa las contribuciones de la descarga de agua, precipitación y evaporación por unidad de área.

$$A = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad (3.35)$$

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

Las ecuaciones en las direcciones ξ y η son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu = \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (3.37)$$

Donde P_ξ y P_η representan los gradientes de presión. Las fuerzas F_ξ y F_η representan el balance de las tensiones horizontales de Reynolds. M_ξ y M_η representan las contribuciones de momentos debido a fuerzas externas (estructuras hidráulicas, descargas de agua, tensiones de oleaje, etc). v_v representa la viscosidad vertical.

3.5.2 Condiciones de contorno

El Flow tiene en cuenta tanto velocidad del viento, temperatura, mareas, salinidad, transporte de sedimentos, etc. En este trabajo, para el estudio de las corrientes la única condición impuesta ha sido la de marea astronómica. Esta se modela como una suma de armónicos

(Ecuación 3.38):

$$H(t) = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i F_i \cos(w_i t + (V_0 + u)_i - G_i) \quad (3.38)$$

donde $H(t)$ es el nivel del mar en el instante t , A_0 es el nivel medio del mar para un determinado período, k es el número de componentes de marea, A_i la amplitud de cada componente, w_i la velocidad angular, F_i un factor de amplitud nodal, $(V_0 + u)_i$ es un argumento de corrección, y G_i es la fase del armónico.

Los armónicos que forman la marea se han obtenido del mareógrafo de Tarifa, el más cercano a la ubicación de la granja. Sólo se han tenido en cuenta aquellos de amplitud superior a 5 cm, y son los siguientes:

- Componente N2 (Lunar elíptica semidiurna): Amplitud = 8.82 cm y Fase = 26.88°
- Componente S2 (Solar principal semidiurna): Amplitud = 15.72 cm y Fase = 69.07°
- Componente M2 (Lunar principal semidiurna): Amplitud = 41.82 cm y Fase = 41.63°

4 Análisis de resultados

En este apartado se van a presentar los resultados obtenidos y un análisis de los mismos, en términos de producción energética, operatividad e impacto ambiental.

4.1 Producción energética

En cuanto a la producción energética propiamente dicha, es interesante representar la P acumulada total en los 25 años con respecto al área ocupada por las granjas. En la Figura 4.1 podemos observar para las distintas configuraciones la producción energética total en función del área que ocupan. Se observa que la separación entre dispositivos es un factor fundamental, puesto que a mayor distancia entre los mismos, se produce menor reducción de altura de ola y por tanto mayor P (Ecuación 3.20). Esto se va a estudiar más adelante con el llamado Q factor (Sección 4.1.1). La distribución desalineada 6D es la más eficiente en términos de producción energética, con una diferencia del 0.4% con respecto a la siguiente, que aunque parecen diferencias pequeñas, son significativas con los márgenes comerciales que tiene la granja. La distribución trapezoidal se comporta mejor para las otras dos separaciones. De esta gráfica se ha obtenido una función de ajuste general (Ecuación 4.1) para obtener P (Figura 4.2). Como se observa, el ajuste es razonablemente bueno ($R^2 = 0.9198$), y a partir de cierta área ocupada (para un mismo número de dispositivos) la función se vuelve asíntota, es decir, a partir de una cierta separación las interacciones entre WECs ya no son importantes.

$$P(kW/m) = 2.57 \cdot 10^7 * \tanh(0.074 * A(Ha)) \quad (4.1)$$

En cuanto a la evolución de la producción durante los 25 años para las distintas configuraciones (Figura 4.3 a 4.4), se observa, como ya se ha comentado, que a mayor separación entre dispositivos, más energía se produce, lo cual es lógico puesto que las interacciones entre WECs son menores, hay menor reducción de altura de ola y por tanto mayor P (Ecuación 3.20). Las fluctuaciones de las curvas a lo largo del tiempo se deben a las diferencias productivas entre los meses de verano e invierno.

También se ha representado la energía total acumulada en los 25 años para cada dispositivo y geometrías (Figura 4.6). Se observa una gran diferencia entre los dispositivos enfrentados a la dirección dominante y el resto, debido a la interacción de la granja. También podemos ver que a mayor separación entre dispositivos, menores son las diferencias de producción

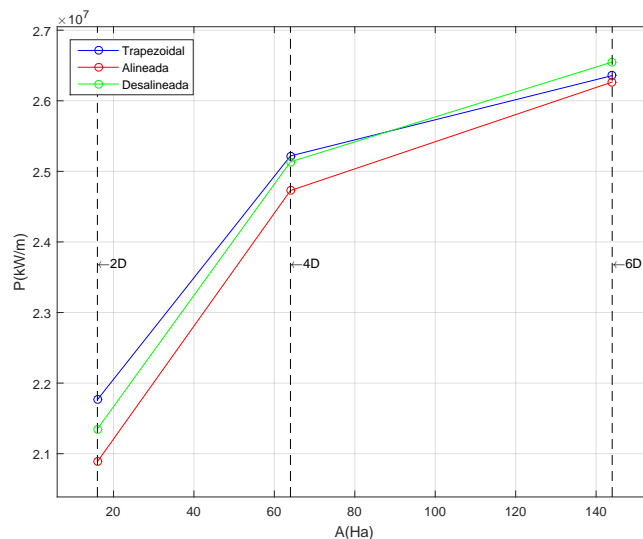


Figura 4.1 P (kW/m) obtenida en 25 años en función del área.

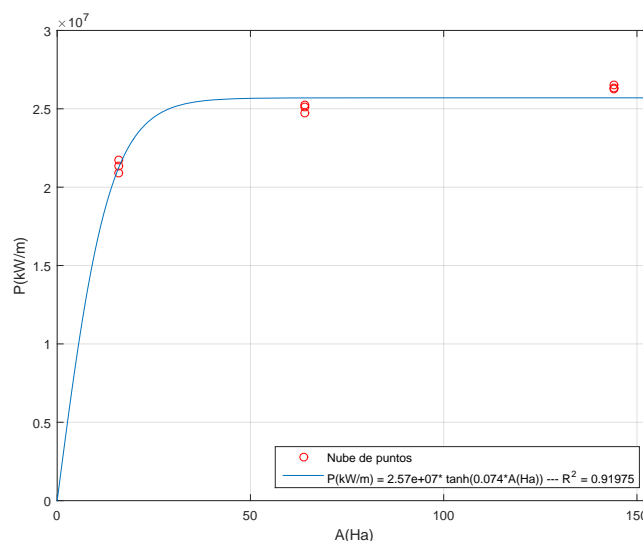


Figura 4.2 Función de ajuste P(A).

entre los mismos (Figura 4.7). Esto se debe a que las interacciones son menores y por tanto tienen alturas de ola similares. Además, la distribución desalineada es en la que menos diferencia hay entre la producción de dispositivos, aunque con poca variación.

A partir de este momento, dado que para cada factor se obtienen 9 gráficas (1 por granja), para evitar aburrir al lector, en este documento se van a mostrar las gráficas únicamente para la distribución trapezoidal con separación 2D. Para consultar el resto de las gráficas váyase al Apéndice B.

Primero, vamos a ver la producción anual de la granja (Figura 4.8). Se observa bastante variabilidad entre los resultados, dado a que no todos los años tenemos el mismo clima.

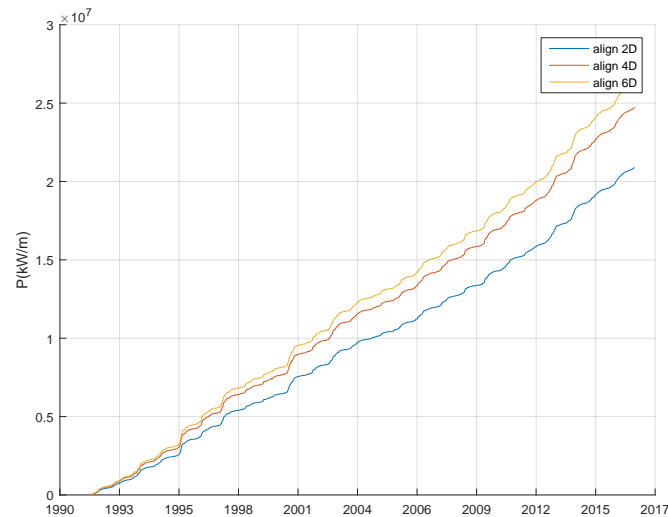


Figura 4.3 P (kW/m) acumulada distribución alineada.

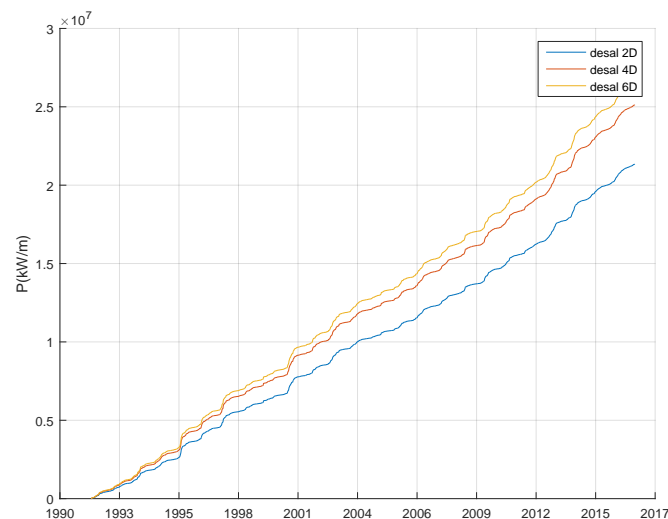


Figura 4.4 P (kW/m) acumulada distribución desalineada.

Esta tendencia es similar para el resto de distribuciones.

En cuanto a la producción estacional (Figura 4.9), observamos que la tendencia es que se produce más energía, en los meses de invierno y otoño, frente a la primavera y verano. Esto es debido a un clima más anticiclónico durante los meses cálidos. Esta tendencia es similar para el resto de distribuciones.

Otro valor interesante es la energía acumulada para cada dirección (Figura 4.10). Observamos que la producción acumulada es mayor para el rango de direcciones W-NW, mientras que para el resto de direcciones es prácticamente nula en comparación. Esto se debe a que es la dirección dominante del oleaje, por lo que es lógico que tenga mayor energía acumulada.

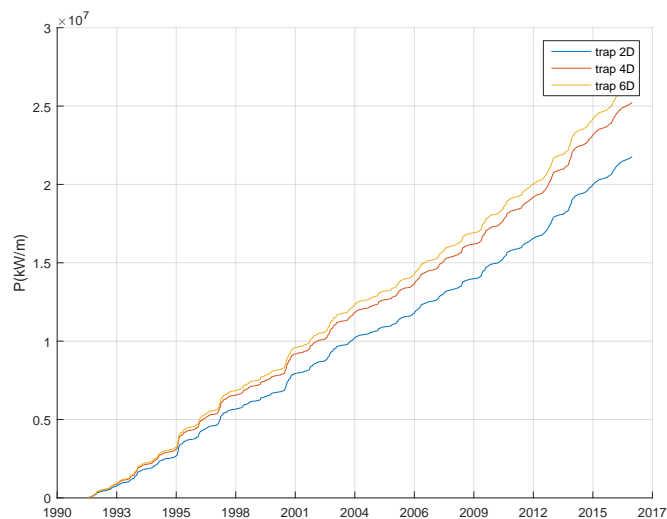


Figura 4.5 P (kW/m) acumulada distribución trapezoidal.

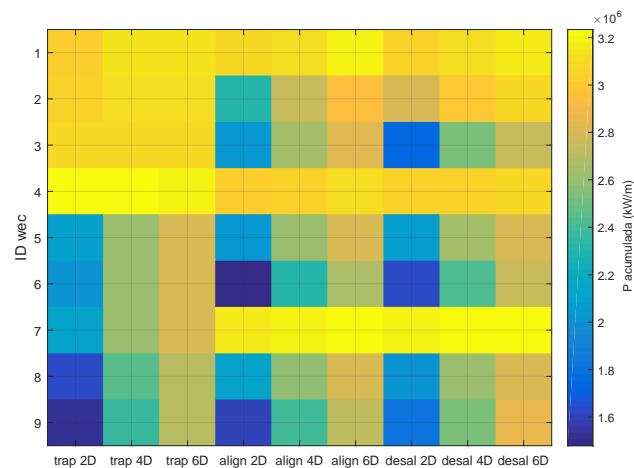


Figura 4.6 P (kW/m) por dispositivo y geometría.

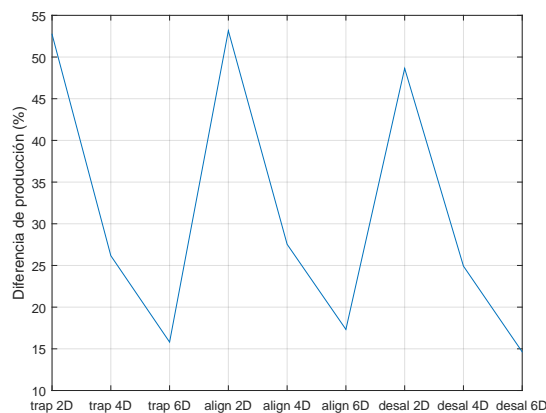


Figura 4.7 Diferencia de producción energética máxima.

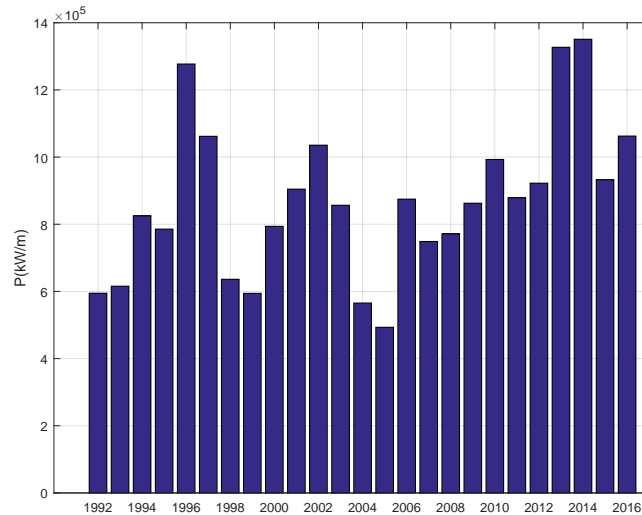


Figura 4.8 Producción anual distribución trap2D.

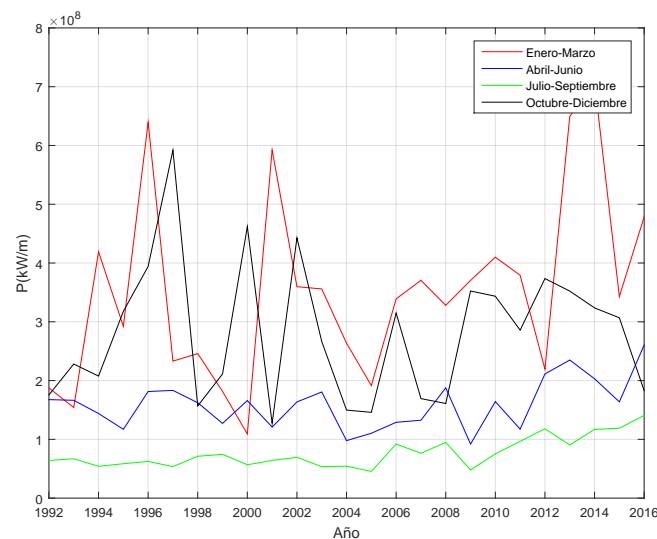


Figura 4.9 Producción por meses distribución trap2D.

Esta tendencia es similar en todas las distribuciones. Por tanto, comprobamos que la hipótesis de orientar el lado más productivo de las geometrías hacia esta dirección ha sido correcta.

4.1.1 Interacción entre dispositivos

Es interesante conocer las diferencias de producción de los dispositivos como parte de la granja con la producción de los dispositivos si estuvieran aislados. Para ello en el modelo numérico (Sección 3.2), se han obtenido resultados con un único dispositivo (Figura 4.11), para así poder realizar estas comparaciones. Dado que las diferencias de profundidad entre los dispositivos dentro de la granja son pequeñas, y que a las profundidades en que se encuentra la granja nos encontramos en régimen de aguas profundas, en el que la profundi-

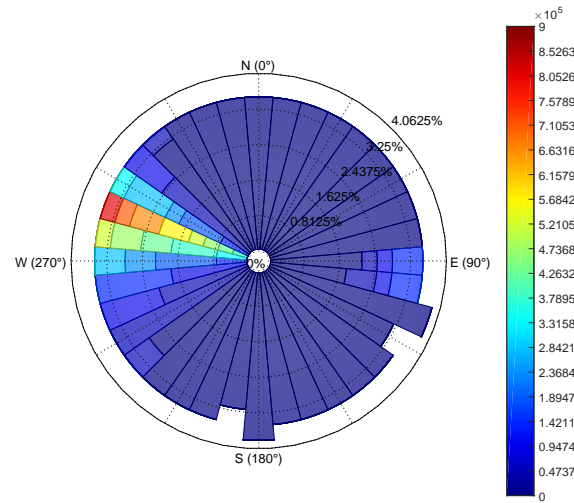


Figura 4.10 $P(\text{kW/m})$ acumulada por dirección distribución trap2D.

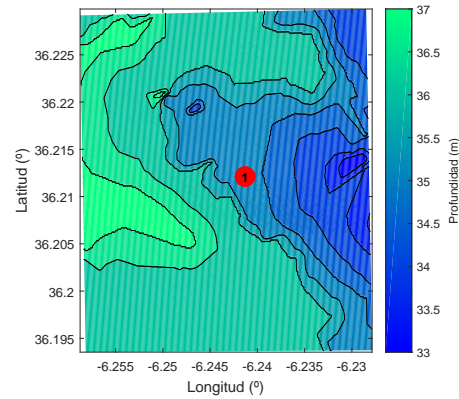


Figura 4.11 Dispositivo aislado para la comparación con los de la granja.

dad tiene una influencia mínima en la propagación de oleaje, se pueden comparar todos con el mismo WEC aislado, estando seguros de que los errores que se producirán son despreciables.

Tenemos para ello que calcular tres factores:

- Correlación (r)
- RMSE (Root Mean Square Error)
- Qfactor

Correlación

Mediante la correlación (Ecuación 4.2), obtenemos la proporcionalidad entre dos variables (Energía del WEC como parte de la granja (P) y aislado (P_{iso})). Cuando r es igual a 1, significa que P y P_{iso} son vectores paralelos, es decir, que la variación de la P producida con respecto a cada estado de mar es igual para ambos. Cuando r es 0, ambos vectores son perpendiculares, es decir, la producción es completamente distinta. Como es lógico, nunca

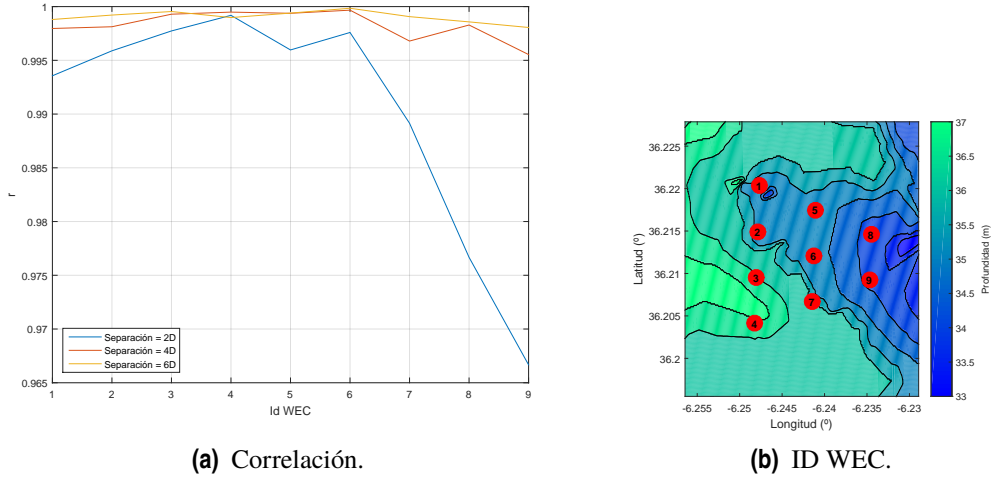


Figura 4.12 Correlación (r) para la distribución trapezoidal.

se van a obtener dichos valores extremos, es más, obtendremos valores muy cercanos a 1, como observamos en las gráficas 4.14, 4.13 y 4.12. Cuanto menor es la separación entre dispositivos menor correlación tendremos, puesto que las interacciones entre WECs son mayores y mayor diferencia de producción habrá con la del aislado. Esto es así también si lo analizamos dispositivo a dispositivo, puesto que aquellos que están influenciados por otros, tienen menor r que aquellos que no ven reducida su altura de ola por la presencia de otros, llegando a tener éstos últimos unos valores que son prácticamente 1. Además, la geometría trapezoidal es la que menor variabilidad presenta, es decir, es en la que menos negativa es la interacción entre dispositivos para la producción energética.

$$r = \frac{1}{N} * \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}) (P_{iso_i} - \bar{P}_{iso})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{iso_i} - \bar{P}_{iso})^2}} \quad (4.2)$$

Donde r es la correlación para cada dispositivo, N es el número de estados de mar, P es el vector de energía producida por el WEC formando parte de la granja para cada estado de mar y P_{iso} es el vector de energía producida por el WEC solo para cada estado de mar.

Error medio cuadrático

El error medio cuadrático (en adelante RMSE) (Ecuación 4.3), representa la desviación estándar de la diferencia de producción del dispositivo como parte de la granja y aislado. Como se observa en las figuras 4.17, 4.15 y 4.16, la variación es significativa (del orden de kW/m), por lo que obviamente la interacción de la granja hace que la producción de cada dispositivo sea menor. También se observa, como es lógico, que a una mayor separación entre dispositivos la diferencia es menor, ya que se parece la energía producida mucho más a la del WEC aislado. Además, el RMSE es mayor cuanto más ocultos estén los dispositivos, por ejemplo, en la distribución trapezoidal (Figura 4.15), la diferencia es mayor en las filas traseras que en las delanteras, ya que los traseros se ven más influenciados por la presencia de los delanteros. En las distribuciones alineada y desalineada, es mayor en aquellos dispositivos situados en las zonas de sombra de los otros dispositivos, donde más

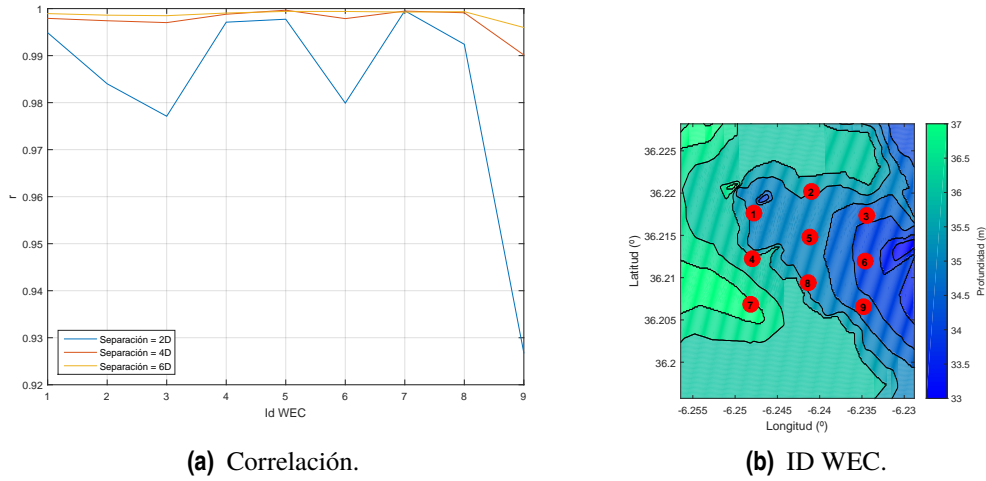


Figura 4.13 Correlación (r) para la distribución desalineada.

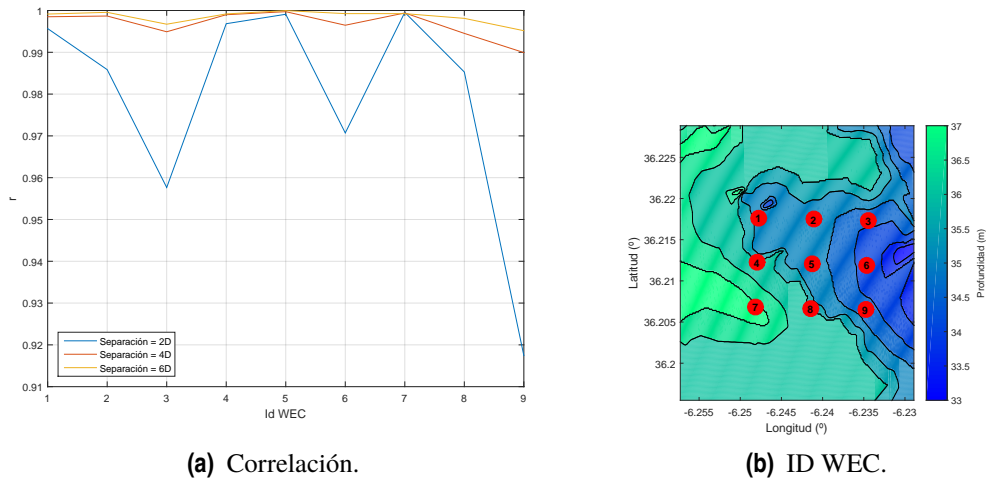


Figura 4.14 Correlación (r) para la distribución alineada.

negativo será el efecto de la granja.

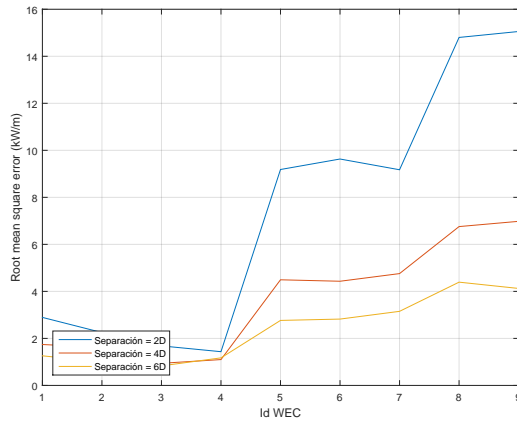
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - P_{iso_i})^2}{N}} \quad (4.3)$$

Donde N es el número de estados de mar, P es el vector de energía producida por el WEC formando parte de la granja para cada estado de mar y P_{iso} es el vector de energía producida por el WEC solo para cada estado de mar.

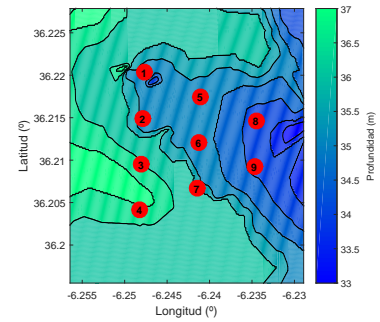
Qfactor

El q-factor es un factor que relaciona directamente la energía del dispositivo como parte de la granja y la del dispositivo aislado. Se pueden producir varias casuísticas:

- $q_{factor} < 1$: en este caso las interacciones entre WECs ejercen un efecto negativo sobre el dispositivo, y éste tendrá una producción menor que si se instalara de manera

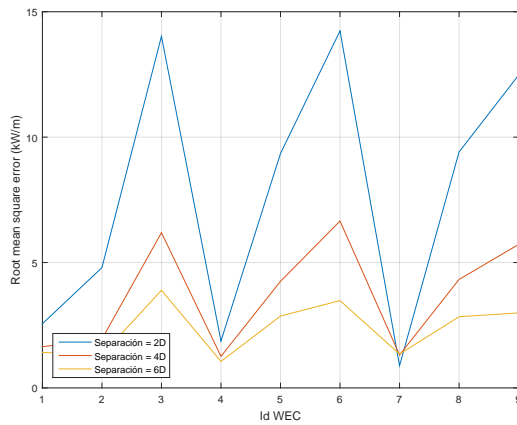


(a) RMSE.

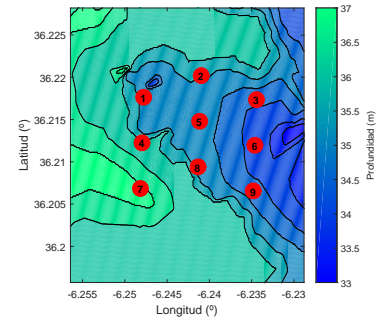


(b) ID WEC.

Figura 4.15 RMSE para la distribución trapezoidal.

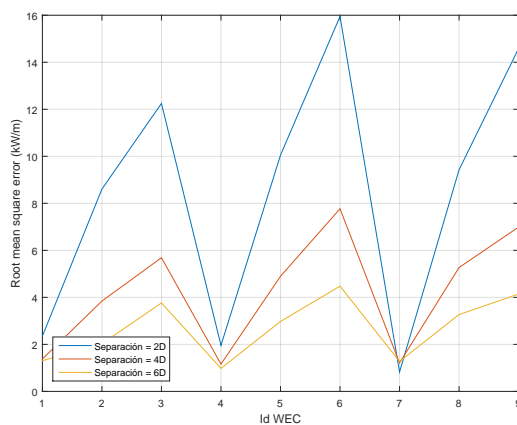


(a) RMSE.

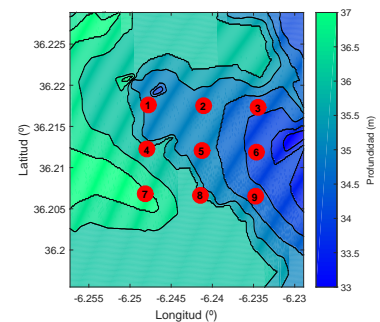


(b) ID WEC.

Figura 4.16 RMSE para la distribución desalineada.



(a) RMSE.



(b) ID WEC.

Figura 4.17 RMSE para la distribución alineada.

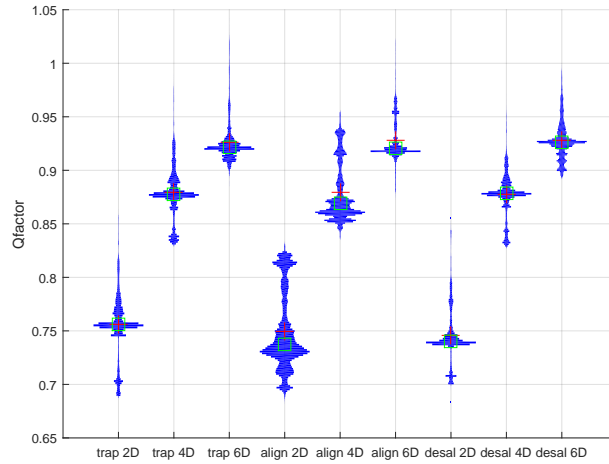


Figura 4.18 Inferencia estadística del q-factor para las distintas geometrías.

aislada. Esta es la situación más probable puesto que generalmente el efecto de la granja será de reducción de la altura de ola.

- $q_{factor} = 1$: este caso, que es bastante improbable, se producirá cuando la energía producida por el dispositivo dentro de la granja sea exactamente igual que la del dispositivo aislado.
- $q_{factor} > 1$: en este caso, las interacciones entre WECs tienen un efecto positivo sobre la producción del dispositivo, ya que esta es mayor que cuando se coloca aislado. Esto se debe a posibles efectos de reflexión entre dispositivos, teniendo así mayor altura de ola en el WEC respecto al aislado.

El qfactor se define como (Ecuación 4.4):

$$q_f = \frac{P_{granja}}{N * P_{iso}} \quad (4.4)$$

Donde P_{granja} es la producción de la granja, P_{iso} es la producción del dispositivo aislado, y N el número de WECs. El factor habrá que calcularlo para todos los estados de mar.

Los resultados obtenidos (Figura 4.18) son en su mayoría menores que 1, aunque se observan algunas configuraciones con influencia positiva. Para su representación se ha utilizado una figura con "violines", y su interpretación es la siguiente:

- El ancho de los violines representa la probabilidad de tener ese valor, es decir cuanto más ancho más se repite dicho valor en los 25 años
- La cruz roja representa la media de todos los valores
- La caja verde representa la mediana, es decir, el valor que está justo en medio de la distribución, aquel que se supera un 50 % de las veces.

Se observa que el qfactor es mayor cuanto mayor es la separación entre dispositivos, llegando a ser incluso superior a 1 (el efecto de la granja es positivo), en algunos casos para

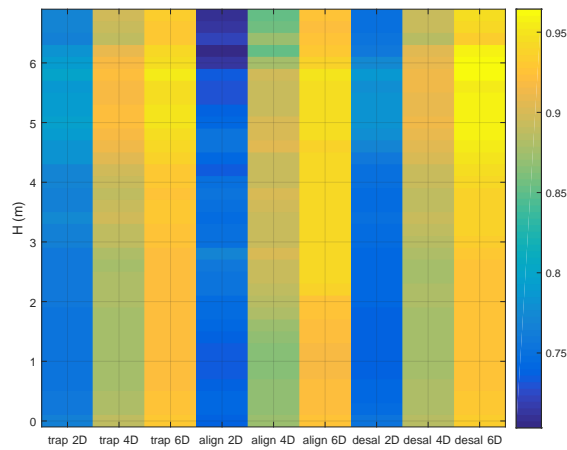


Figura 4.19 Qfactor en función de la altura de ola para las distintas geometrías.

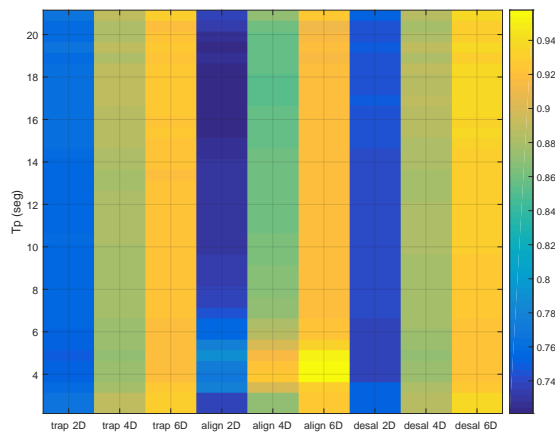


Figura 4.20 Qfactor en función del período para las distintas geometrías.

la separación 6D. Se observa un comportamiento parecido en cuanto al qfactor para las 3 geometrías, influyendo principalmente la separación entre dispositivos, aunque en la distribución alineada hay menos variabilidad del qfactor.

Asimismo, se ha estudiado la variabilidad del qfactor en función de las variables del oleaje (Altura de ola, período y dirección).

Para el q-factor según la altura de ola y el período, obtenemos los resultados vistos en las figuras 4.19 y 4.20. No se observa ninguna tendencia en particular.

Para el q-factor en función de la dirección, se ha calculado el mismo de una manera distinta a la anterior, en la que lo calculábamos de manera global. En este caso se va a calcular para

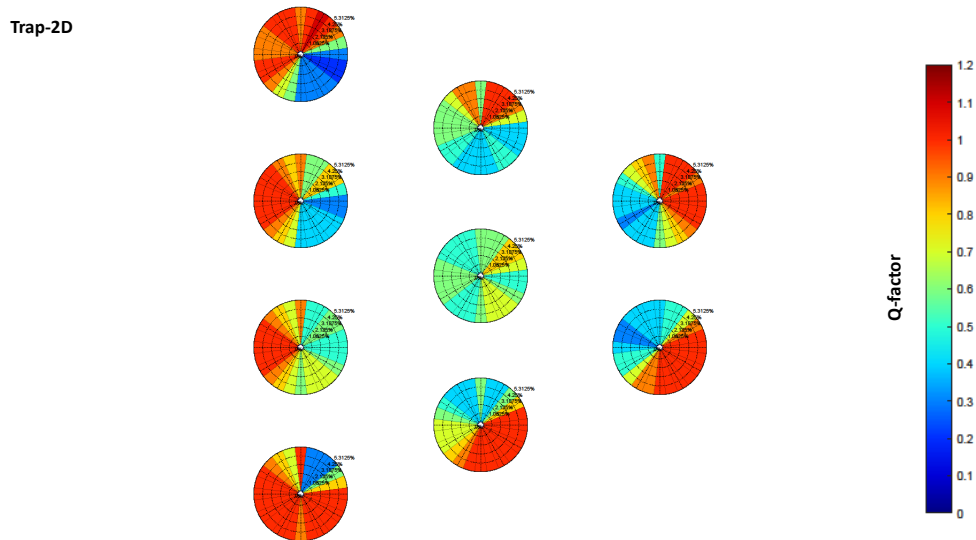


Figura 4.21 Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución trap2D.

cada dispositivo de manera individual (Ecuación 4.5).

$$q_{factor} = \frac{P_{wec_{farm}}}{P_{iso}} \quad (4.5)$$

Donde $P_{wec_{farm}}$ es la producción del dispositivo como parte de la granja y P_{iso} es la producción del dispositivo aislado.

Para su representación, se ha optado por representar la mediana de los qfactor obtenidos para cada dirección. Se puede observar que el qfactor es mayor para aquellas direcciones donde se sitúa el espacio abierto (Figura 4.21), es decir, donde no tienen influencia de los demás dispositivos de la granja, para las que en algunos casos llegan incluso a tener un qfactor mayor que 1, siendo positivo el efecto de la granja. Para todas las geometrías se ha observado una tendencia similar.

4.2 Eficiencia e impacto ambiental

Desde el enfoque medioambiental, es interesante conocer la producción unitaria, es decir, la energía producida entre la superficie ocupada (Figuras 4.22 a 4.24). Observamos que son mejores aquellas configuraciones con una separación entre dispositivos igual a 2 veces el diámetro de los mismos, es decir, el área ocupada tiene una mayor influencia que el aumento de la energía por la reducción de la interacción entre dispositivos. Deducimos por tanto que a mayor separación entre dispositivos, menor es la producción unitaria, es decir, aunque la energía es mayor la influencia del aumento del área es más importante. En estos términos, la distribución más eficiente es la trapezoidal 2D, con una diferencia del 2% con respecto a la siguiente. Para las separaciones 4D y 6D el comportamiento de las distintas geometrías es similar, aunque con una eficiencia mucho menor respecto a las de separación 2D.

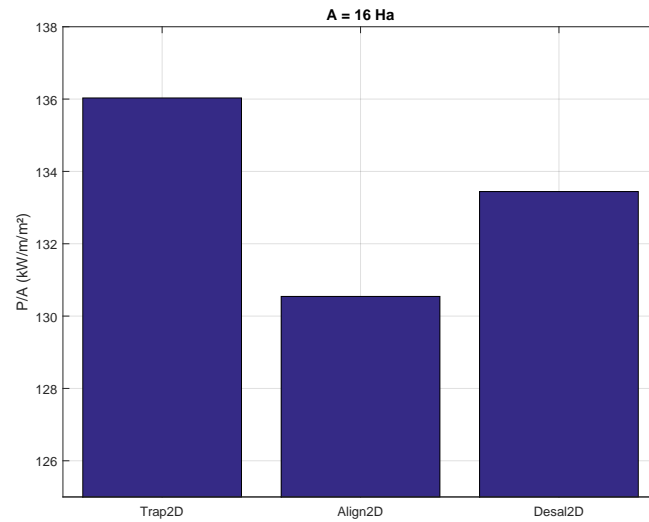


Figura 4.22 Energía por unidad de área separación 2D.

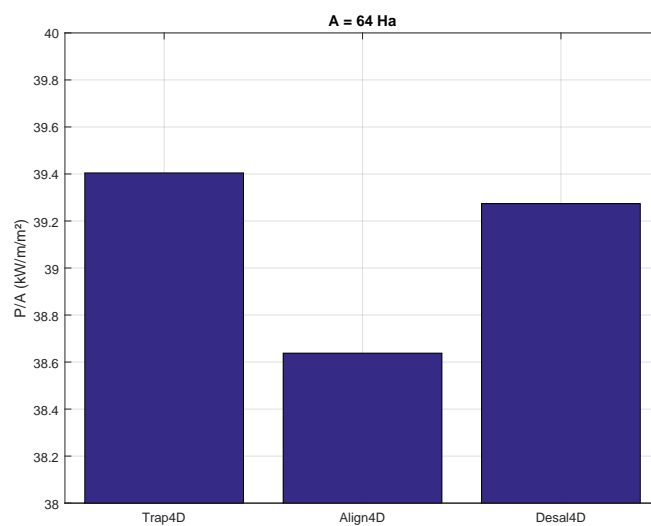


Figura 4.23 Energía por unidad de área separación 4D.

4.3 Operatividad y mantenimiento

En términos de viabilidad económica, los factores relacionados con la operatividad y mantenimiento de los dispositivos son de gran importancia [18], dado que mediante un buen estudio de los mismos podremos optimizar recursos, ahorrando costes a la vez que se le hace un mejor mantenimiento a los dispositivos. El mantenimiento se basa en operaciones marinas que principalmente consisten en barcos trabajando cerca de los dispositivos. Para ello, se requieren ventanas de tiempo de condiciones suaves de oleaje. Las condiciones de disponibilidad y accesibilidad tienen un impacto significativo en la amortización de la

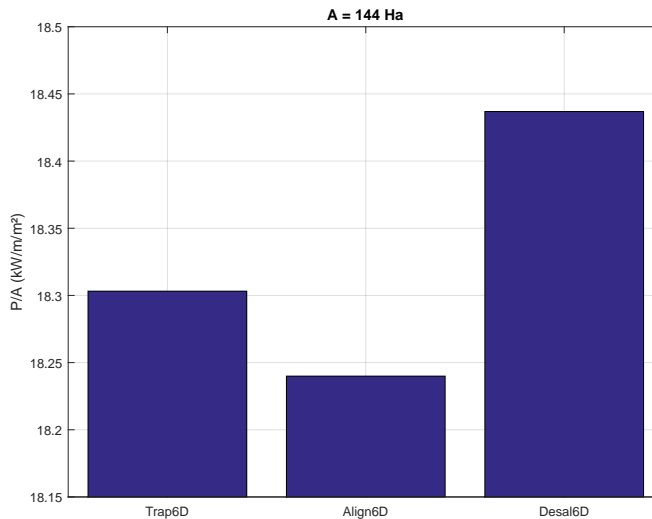


Figura 4.24 Energía por unidad de área separación 6D.

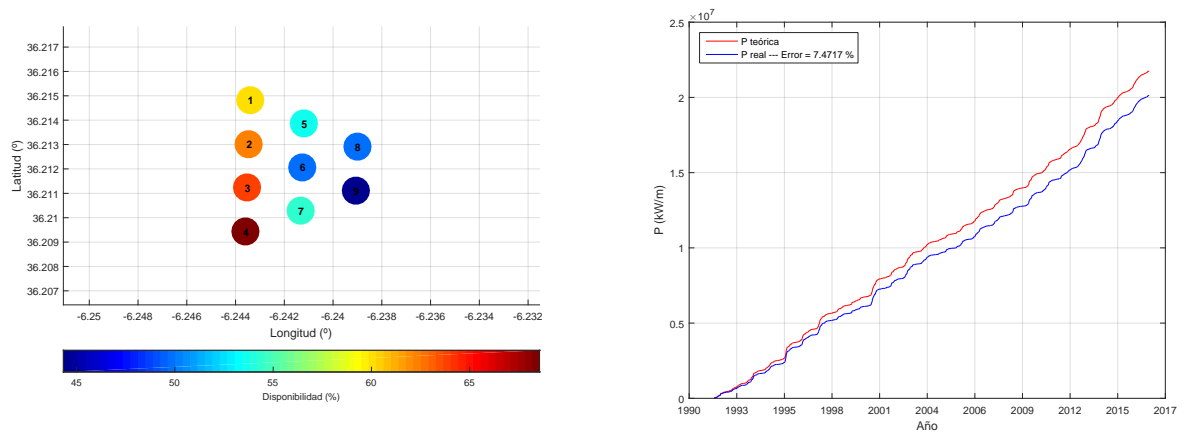
inversión de este tipo de proyectos [19]. En esta sección, se estudia este tema usando cuatro factores[18]:

- Disponibilidad
- Accesibilidad
- Ventanas de tiempo
- Tiempo de espera

4.3.1 Disponibilidad

La disponibilidad se define como el porcentaje del tiempo que los dispositivos pueden producir energía con las condiciones de oleaje. Esto se debe a que estos tienen un rango de funcionamiento, por debajo del cual son incapaces de producir energía, y por encima del cual entra en el llamado "modo de supervivencia" [14]. Esto significa que la estructura del dispositivo resiste dichas alturas, pero sus mecanismos internos no son capaces de producir energía con alturas tan grandes, por lo que se cierran. Para nuestro dispositivo se ha utilizado un rango de funcionamiento igual a 0.75 - 5.9 m. Para su cálculo necesitaremos la altura de ola propagada en cada dispositivo durante los 25 años de vida útil. Esta es obtenida interpolando a partir de los resultados obtenidos mediante el modelo numérico para la base de datos de 300 estados de mar.

Los resultados obtenidos (Figura 4.25), muestran cómo los dispositivos que menos se ven influenciados por la granja (en el ejemplo de la distribución trap2D, los de la columna frontal), son aquellos con mayor disponibilidad. Esto se debe a que en la mayoría de los casos la no disponibilidad se va a deber a alturas por debajo del rango más que a alturas demasiado grandes, por lo que los WEC más influenciados por la granja, que son los que generalmente tendrán menores alturas, sean los que estarán menos tiempo produciendo energía. Por este mismo motivo, a mayor separación entre dispositivos también será mayor la disponibilidad, dado que tendremos alturas mayores. Las 3 geometrías tienen un comportamiento similar



(a) Disponibilidad.

(b) Producción real.

Figura 4.25 Disponibilidad distribución trapezoidal 2D.

en este sentido, siendo más influyente la separación entre dispositivos. También se ha representado la producción real, es decir, la energía acumulada teniendo en cuenta ahora este rango de funcionamiento, y hay una variación significativa, con errores relativos entre 5-8 %.

4.3.2 Accesibilidad

La accesibilidad es un factor muy importante, y es el porcentaje de tiempo que el dispositivo es accesible para realizar labores de mantenimiento. Es necesario definir una altura de ola a partir de la cual no es posible navegar para acceder a la granja ni trabajar en los dispositivos. Esta altura, en el Océano Atlántico, es igual a 1.5 m. Para su cálculo, se ha comparado la altura de ola que llega a cada dispositivo para todos los estados de mar con esta altura límite (para tener en cuenta el dispositivo en el que se trabaja), pero también se ha comparado la altura de ola del dispositivo aislado con la altura límite (para tener en cuenta la navegabilidad desde la costa hacia la granja).

En los resultados (Figura 4.26) se observa que todos los WECs tienen una accesibilidad similar. Esto es debido a que es más limitante la accesibilidad a la granja que el dispositivo en el que trabaja, puesto que generalmente la altura del dispositivo aislado es mayor que la del dispositivo como parte de la granja, debido a la interacción entre WECs, por lo que todos los dispositivos tienen la accesibilidad de los que menos se ven influenciados por la granja, dado que estos tienen alturas similares a la del aislado. Por este mismo motivo, además, las 9 configuraciones de granja tienen una accesibilidad similar, dado que principalmente ésta dependerá del estado de mar correspondiente, más que de las interacciones que se produzcan dentro de la granja. Esto también es aplicable para el número de ventanas de tiempo y el período medio de espera, explicados en los apartados siguientes, dado que se han calculado con el mismo criterio.

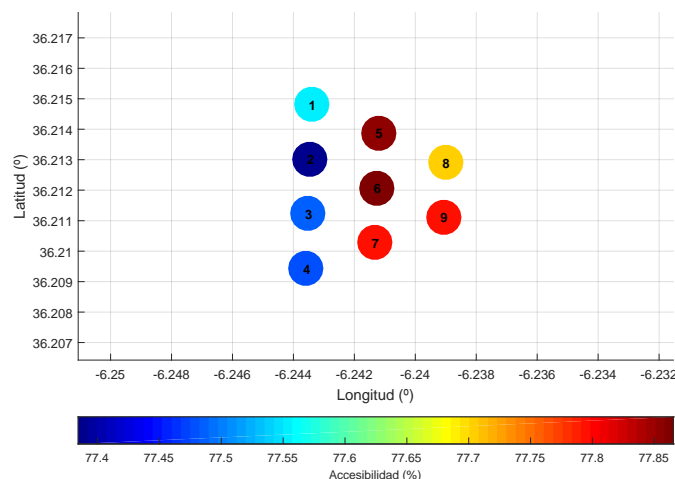


Figura 4.26 Accesibilidad distribución trapezoidal (2D).

4.3.3 Ventanas de tiempo

Es un factor muy importante para el mantenimiento de la granja, y se define como un número determinado de horas seguidas en que las condiciones de clima permiten realizar tareas de mantenimiento en la granja. Se han calculado comparando las alturas de ola propagadas en los dispositivos (interpolando a partir de los resultados obtenidos del modelo numérico para la base de datos de 300 estados de mar) con la altura límite a partir de la cual no es posible la navegación comentada en el apartado anterior. Dado que nuestros resultados tienen frecuencia horaria, si una altura propagada es menor que la altura límite, tendremos una hora en la que se puede trabajar. Dado que con sólo una hora es suficiente, hay que determinar un número mínimo de horas seguidas para poder tener una ventana de tiempo. Se han definido tres duraciones para las ventanas, 6, 12 y 24 horas. Por tanto, se considera que tenemos una ventana de tiempo cuando tenemos un número de estados de mar correlativos de frecuencia horaria superior a los valores determinados para las ventanas. Es lógico que tendremos un número mayor de ventanas de tiempo cuanto menor sea su duración (Figuras 4.27 a 4.29).

Otro valor a tener en cuenta es el tiempo medio de espera, que es el tiempo medio de espera para tener una ventana de tiempo. Se ha calculado haciendo la media del número de horas que hay entre las ventanas de tiempo. Se observa que todos los dispositivos tienen tiempos muy parecidos (Figuras 4.30 a 4.32), por el mismo motivo que la accesibilidad. También, aquellos que más se ven influenciados por la granja tienen tiempos ligeramente menores, debido a unas alturas de ola menores.

4.4 Parámetros de diseño de los WECs

En términos económicos, para que la granja resulte rentable, es fundamental hacer una buena selección de los dispositivos, ya que deben ser lo suficientemente resistentes para el oleaje en la zona pero no deben estar excesivamente sobredimensionados para evitar

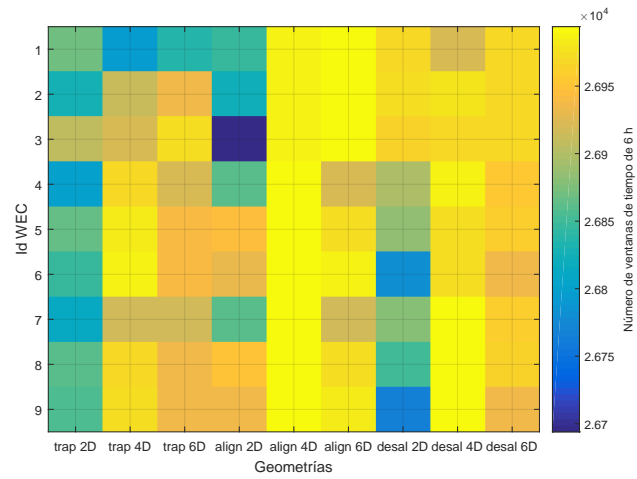


Figura 4.27 Número de ventanas de tiempo de 6 h.

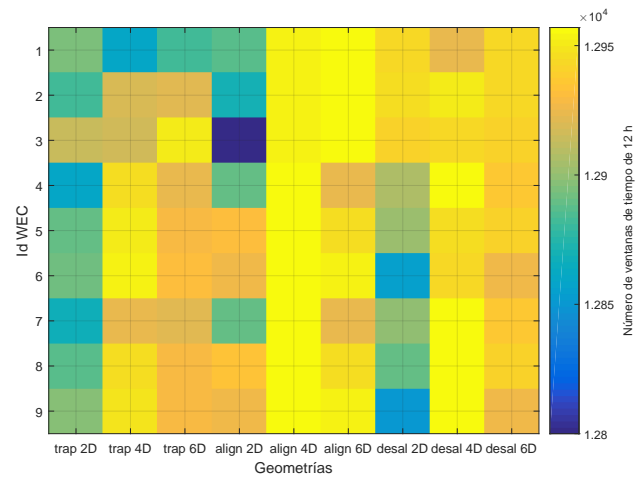


Figura 4.28 Número de ventanas de tiempo de 12 h.

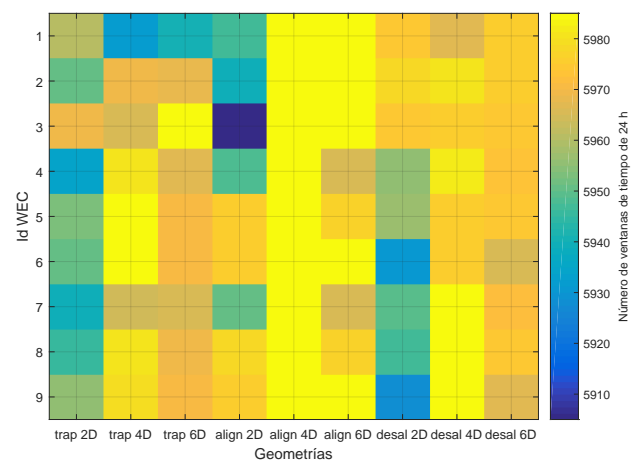


Figura 4.29 Número de ventanas de tiempo de 24 h.

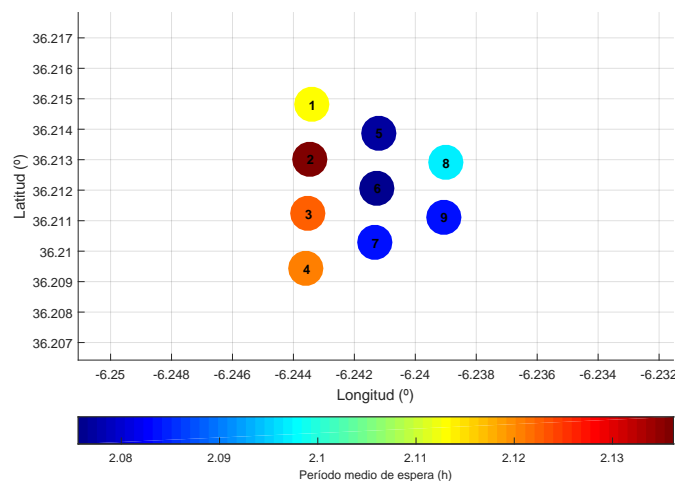


Figura 4.30 Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 6 h).

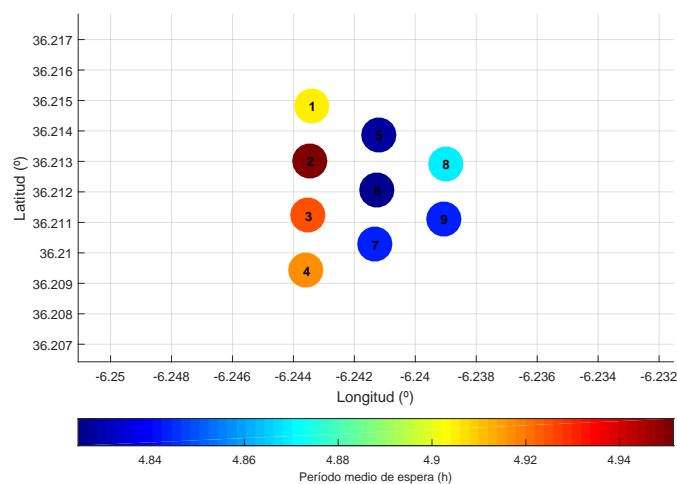


Figura 4.31 Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 12 h).

sobrecostos innecesarios. Por ello, los 9 WECs de la granja no tienen por qué ser iguales, dado que para aquellas localizaciones que se vean más influenciadas por la granja podremos utilizar dispositivos con menor altura de ola de diseño. Por ello, como tenemos la altura de ola propagada en cada dispositivo en los 25 años, se ha obtenido la altura de ola 99 percentil (Figura 4.33), es decir, aquella que sólo es superada un 1 % de las veces, que será la altura de ola de diseño de los dispositivos necesarios. Se observa que, aunque la mayoría de las localizaciones tienen alturas de diseño superiores a los 3 m, hay algunas con alturas inferiores. Sin embargo, a la hora de hacer la inversión para la granja habría que estudiar qué nos saldría más económico, si escoger dispositivos con alturas de diseño inferiores, o comprar todos los WECs iguales para así simplificar el proceso de instalación de la misma.

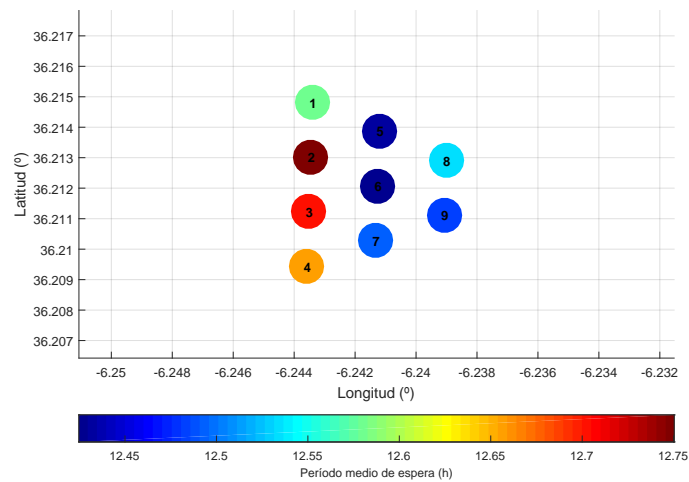


Figura 4.32 Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 24 h).

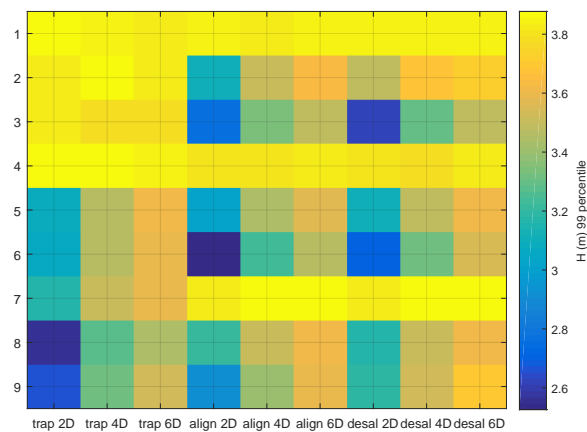


Figura 4.33 Altura de ola 99 percentil.

También es importante conocer cuánta energía produciré con toda probabilidad, para así dimensionar no sólo la estructura del dispositivo, sino también los elementos necesarios para transformar la energía del oleaje en energía eléctrica (alternadores, centro de transformación). Por ello, se ha hecho lo mismo que con la altura de ola propagada para la producción energética para un estado de mar (Figura 4.34).

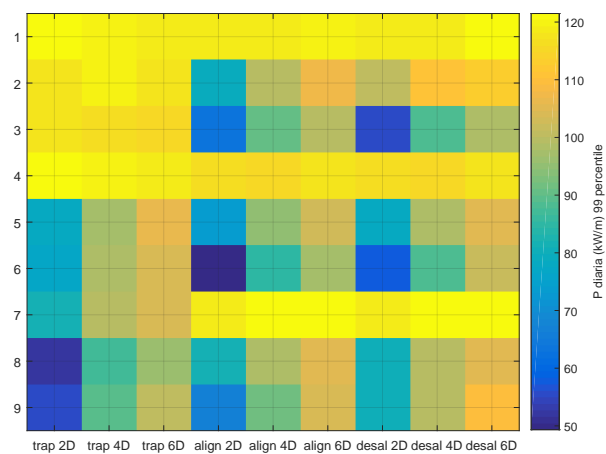


Figura 4.34 Potencia producida (kW/m) 99 percentil.

4.5 Estudio de las corrientes

Como ya se ha comentado en la sección 3.5, se ha realizado un análisis teniendo en cuenta las corrientes, para dos estados de mar de condiciones medias:

- Estado 1: $H_s = 1.5$ m ; $T_p = 11.2$ seg ; $Dir = 290^\circ$
- Estado 2: $H_s = 1.5$ m ; $T_p = 11.9$ seg ; $Dir = 80^\circ$

Las comparaciones que se van a realizar con los resultados ya obtenidos son:

- Energía obtenida con y sin corrientes: En ello influirá la variación de altura de ola con la influencia de las corrientes
- Corrientes con y sin la influencia de la granja: Se estudiará el aumento de la velocidad de las corrientes debido a la presencia de obstáculos, lo que influirá en la navegabilidad y también en la accesibilidad de las granjas

A la hora de realizar la simulación numérica de los distintos casos, se han realizado varias pruebas con intervalos de tiempo de 2.5, 5 y 10 seg, de tal manera que tengamos un número de Courant bajo, asegurando la estabilidad numérica, pero ahorrando en coste computacional. Para los dt de 5 y 10 seg se han obtenido resultados similares, por lo que se ha decidido realizar la simulación con un $dt = 5$ seg.

4.5.1 Energía

Los resultados obtenidos muestran una disminución significativa de la energía obtenida para ambos estados de mar (Figura 4.35), lo que nos indica una influencia negativa de las corrientes en el comportamiento de las granjas, obteniendo una menor altura de ola en los dispositivos (Figura 4.36). Por tanto, el haber simulado el comportamiento de la granja durante la vida útil de los dispositivos sin tener en cuenta el efecto de las corrientes induce a errores grandes en cuanto a la variación de la energía producida, por lo que sería necesario hacer un estudio más en profundidad teniendo en cuenta estos efectos. En cuanto a los resultados obtenidos, se observa una mayor disminución de la altura de ola, y por ende de la energía producida, para el estado de mar 1 (el procedente de la dirección NW).

4.5.2 Corrientes

En este sentido, se ha estudiado la influencia de la presencia de obstáculos, que previsiblemente aumentarán la velocidad del flujo a través de la granja. Para ello en el modelo numérico se han colocado varios puntos de observación en la zona de la granja. El aumento de la velocidad es significativo (Figura 4.37). Se observa un mayor aumento de la velocidad de flujo a menor distancia entre dispositivos, así como un mayor aumento de la misma para los oleajes provenientes del NW (estado 1).

También se incluye el mapa de corrientes para ambos estados de mar (figuras 4.38 y 4.39). Se observan velocidades elevadas, así como un aumento de las mismas en la zona de la granja. Esto podría afectar a la navegabilidad y a la accesibilidad de la granja, por lo que en un futuro sería necesario un estudio más en profundidad de este apartado.

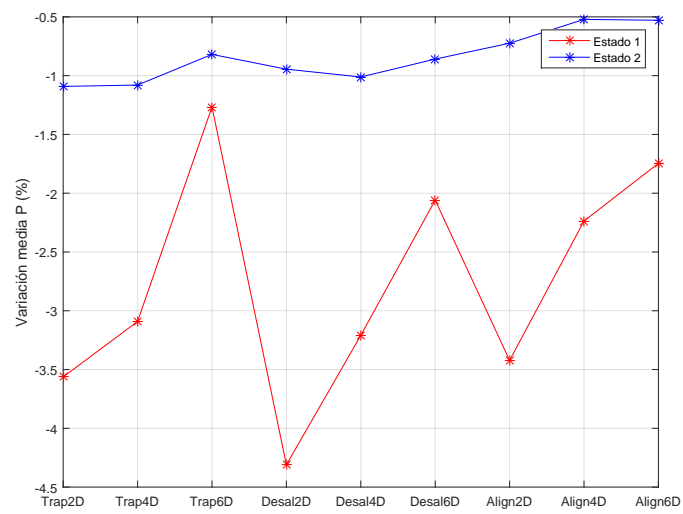


Figura 4.35 Variación media de la energía por la influencia de las corrientes.

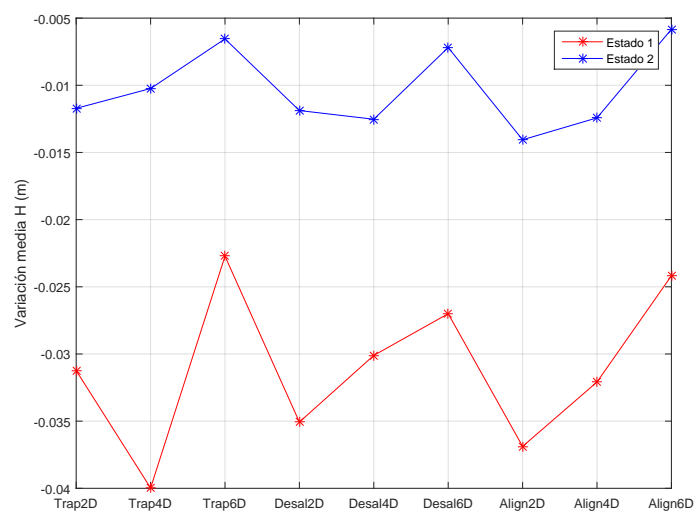


Figura 4.36 Variación media de la altura de ola por la influencia de las corrientes.

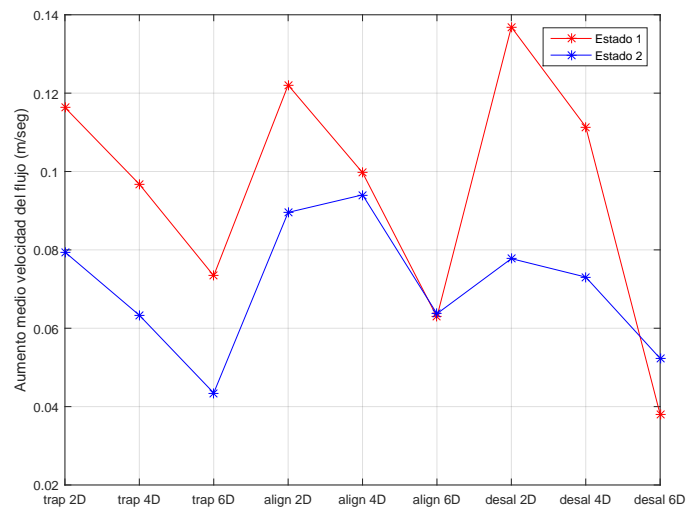


Figura 4.37 Aumento máximo velocidad del flujo.

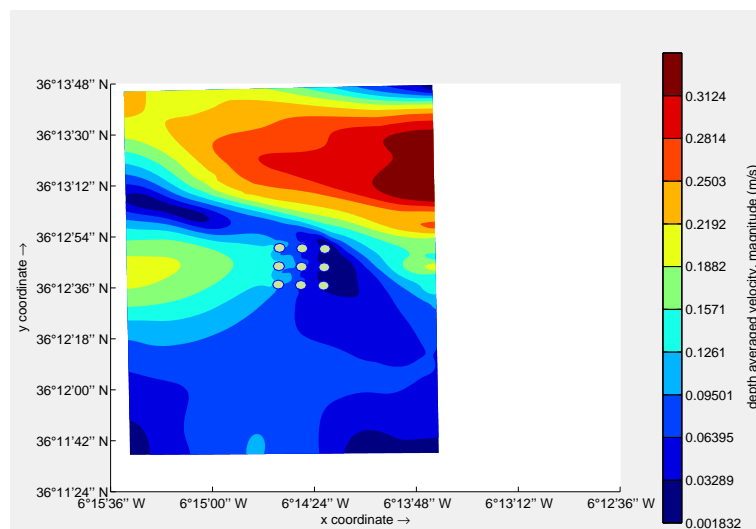


Figura 4.38 Mapa de corrientes estado 1.

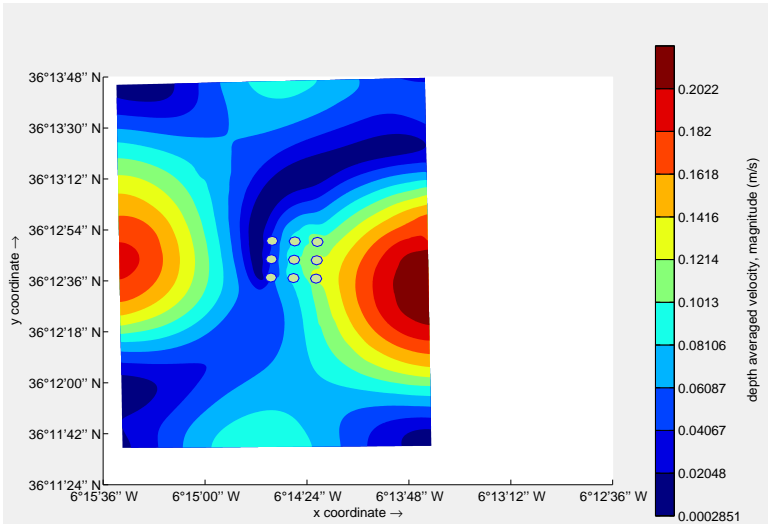


Figura 4.39 Mapa de corrientes estado 2.

5 Conclusiones y trabajo futuro

Aunque las interacciones entre dispositivos se han estudiado en detalle en los últimos años, sólo se ha estudiado considerando ciertos estados de mar. Además, el mantenimiento y la operatividad de las granjas no se ha estudiado en detalle, así como tampoco se ha evaluado la influencia de las corrientes. Mediante este trabajo se ha evaluado el comportamiento de una granja de dispositivos durante toda su vida útil (25 años), evaluando estados de mar de frecuencia horaria, para 9 configuraciones distintas, pudiendo así evaluar la interacción entre dispositivos, y no sólo en términos energéticos, sino también estudiando la facilidad de explotación de la misma, aplicado a un caso práctico en la costa de Cádiz. En base a los resultados obtenidos, se extraen las siguientes conclusiones:

- La distancia entre dispositivos tiene un importante efecto en el potencial energético, ya que a más separación entre dispositivos, mayor energía se produce. Además, en cuanto a la variabilidad entre los dispositivos de la granja con el dispositivo aislado, esta es mayor cuanto menor es la separación entre dispositivos.
- En cuanto a la operación y mantenimiento, es más operable una granja con los dispositivos más cercanos entre sí, ya que habrá más reducción de altura de ola y por tanto más fácilmente accesible, aunque esto vaya en contra de maximizar la producción energética.
- La distribución desalineada 6D es la más eficiente en términos de producción energética, un 0.4 % más que la trapezoidal 6D, la siguiente en términos de eficiencia energética. Aunque parece una diferencia pequeña, es significativa dentro de los estrechos márgenes comerciales en que se encuentran las granjas.
- En cuanto a energía por unidad de superficie ocupada, por tener en cuenta el impacto medioambiental, la más eficiente es la trapezoidal 2D, con un casi 2 % más de eficiencia que la desalineada 2D, la siguiente en eficiencia en estos términos. En este caso, a mayor separación entre dispositivos hay menor eficiencia de producción unitaria de energía.
- En cuanto al mantenimiento, todas las distribuciones tienen un número de ventanas de tiempo y un período de espera parecido, debido a que esto es más dependiente del estado de mar que de la configuración de la granja.
- La influencia de las corrientes es negativa, habiéndose obtenido menor altura de ola, y por ende menor energía producida cuando se ha tenido en cuenta el efecto de las corrientes y el nivel del mar. Dado a los bajos márgenes comerciales dentro de los

que opera este tipo de explotaciones, sería necesario hacer un estudio más exhaustivo teniendo en cuenta estos efectos.

- La granja produce un aumento considerable de la velocidad del flujo, por lo que sería necesario un estudio en profundidad de su influencia sobre la accesibilidad y el mantenimiento de los dispositivos

Como trabajo futuro, podría ampliarse el estudio de las corrientes, analizando más en profundidad su influencia sobre la operatividad de las granjas, así como tener en cuenta el transporte de sedimentos y el posible efecto que podrían tener las granjas sobre el mismo. También podría hacerse una evaluación del recurso usando simulaciones de clima (forecasting).

A lo largo de este trabajo, se han proporcionado las herramientas suficientes para un posible promotor de la granja para la selección, tanto de una geometría óptima, según los intereses del mismo, ya sean maximizar la producción o minimizar el impacto ambiental, como de unos dispositivos adecuados, pudiendo así minimizar el coste de inversión.

Además, este estudio ha permitido elaborar un software descrito más en profundidad en el Apéndice A, mediante el cual se pretende facilitar las labores de explotación de la granja, permitiendo conocer la energía que se va a producir y las ventanas de tiempo de que se dispondrán a partir de las predicciones de oleaje. Esto va a permitir realizar a la empresa concesionaria del servicio una buena optimización de recursos, pudiendo así reducir los costes de explotación, que es uno de los principales problemas por los que todavía este tipo de energías no están muy extendidas.

Por otro lado, se ha visto que la extracción de energía del oleaje es un campo muy amplio y con muchas posibilidades, ya que se podría haber ampliado el estudio a más geometrías, más dispositivos o incluso a distintas profundidades. También se podrían combinar varias aplicaciones, por ejemplo producción de energía y protección frente al oleaje incidente, debido a la elevada reducción de altura de ola tras su paso por la granja.

Sin embargo, como se ha comentado en la introducción, los pasos que se están dando aún no son suficientes, dado que el elevado coste de inversión de una granja de dispositivos para la extracción de energía del oleaje es uno de los principales motivos por los que la participación de este tipo de energías es casi nula, así como el coste de producción, fuera del rango comercial, y la elevada diferencia entre los modelos teóricos y reales. Dados los problemas cada vez mayores derivados de la extracción de los combustibles fósiles, y a que las energías renovables convencionales no han sido capaces de eliminar la dependencia de las energías no renovables, es necesario una mayor investigación en la extracción de energía del oleaje para reducir estos costes y empezar a explotar este recurso a medio-largo plazo, mejorando así las condiciones medioambientales y la calidad de vida de la población.

Apéndice A

Software WAVER

Dado que la gestión de la explotación de una granja de estas características es bastante complicada, se ha creado un software que la facilite, de tal manera que conociendo las predicciones de oleaje en la zona, se pueda conocer la energía que se va a producir, para así asistir a la subasta energética con una información valiosa, así como conocer si los dispositivos serán o no accesibles, a qué hora y durante cuánto tiempo. Mediante este software, que se ha registrado como propiedad intelectual en el registro de la propiedad intelectual de la Junta de Andalucía, se pretende facilitar y mejorar la operatividad de la planta, para así optimizar recursos. La simulación se realiza interpolando a partir de los resultados obtenidos para la base de datos de 300 estados de mar ya comentada.

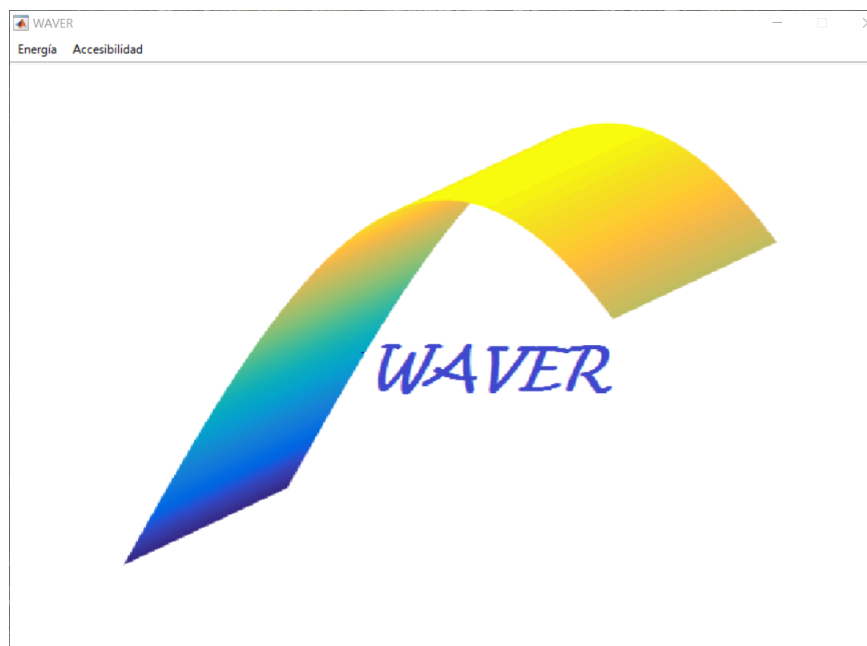
A.1 Requisitos

El software se ha realizado con lenguaje de programación Matlab, y funciona en entornos operativos Windows y Mac, siendo necesario tener el compilador de Matlab "MATLAB runtime" versión 8.5 (R2015a), que es gratuito y puede descargarse del siguiente enlace:

<http://www.mathworks.com/products/compiler/mcr/index.html>

A.2 Funcionamiento de WAVER

Al ejecutar el programa, nos encontramos con la interfaz principal. Desde aquí podremos acceder a cualquiera de los tres módulos de los que consta el programa, dos dedicados a la producción energética y otro al mantenimiento de la granja.



A.2.1 Energía

Dentro de la pestaña "Energía", tenemos dos opciones para insertar el oleaje, manualmente y desde una hoja de cálculo.

Cálculo desde inserción manual

| | Hs (m) | Tp (seg) | Dir (°) |
|-------|--------|----------|---------|
| 00:00 | 0 | 0 | 0 |
| 01:00 | 0 | 0 | 0 |
| 02:00 | 0 | 0 | 0 |
| 03:00 | 0 | 0 | 0 |
| 04:00 | 0 | 0 | 0 |
| 05:00 | 0 | 0 | 0 |
| 06:00 | 0 | 0 | 0 |
| 07:00 | 0 | 0 | 0 |
| 08:00 | 0 | 0 | 0 |
| 09:00 | 0 | 0 | 0 |
| 10:00 | 0 | 0 | 0 |
| 11:00 | 0 | 0 | 0 |
| 12:00 | 0 | 0 | 0 |
| 13:00 | 0 | 0 | 0 |
| 14:00 | 0 | 0 | 0 |
| 15:00 | 0 | 0 | 0 |
| 16:00 | 0 | 0 | 0 |
| 17:00 | 0 | 0 | 0 |
| 18:00 | 0 | 0 | 0 |
| 19:00 | 0 | 0 | 0 |
| 20:00 | 0 | 0 | 0 |
| 21:00 | 0 | 0 | 0 |
| 22:00 | 0 | 0 | 0 |
| 23:00 | 0 | 0 | 0 |

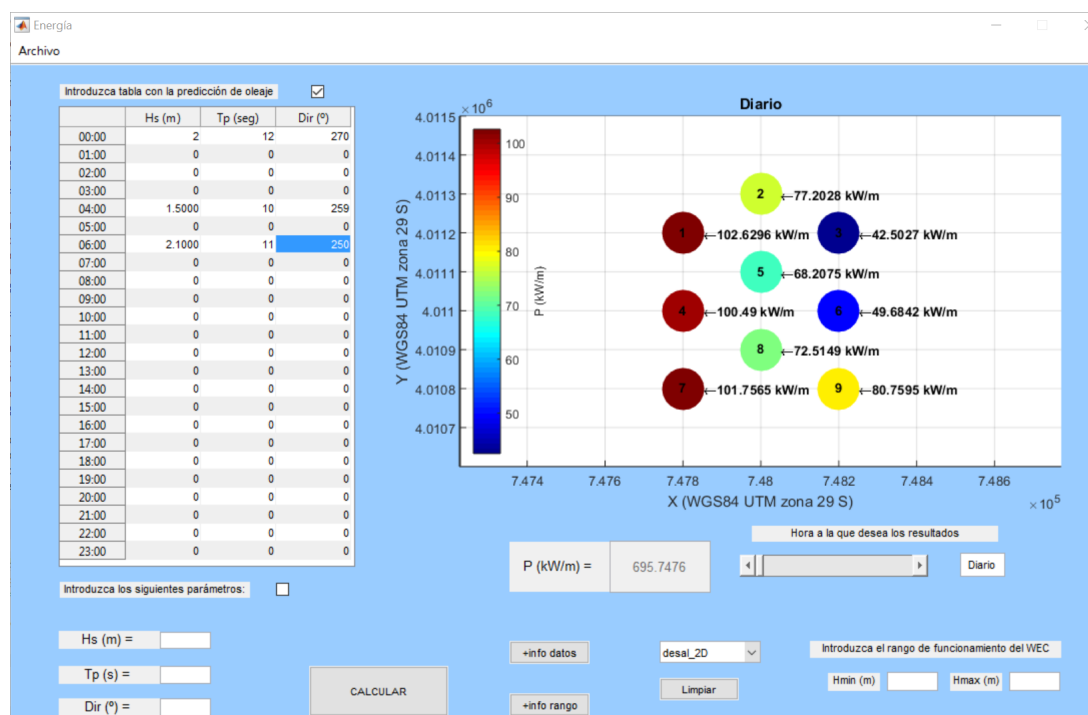
En este apartado tenemos dos opciones de introducir el oleaje manualmente, en una tabla, donde podremos introducir las variables de oleaje para los estados de mar que queramos a su hora correspondiente, o introduciendo un único estado de mar en la parte inferior. Antes de introducir los estados de mar habrá que marcar la casilla correspondiente a la opción

deseada. Las variables a introducir son la altura de ola significativa en m, el período de pico en segundos, y la dirección de procedencia del oleaje en grados, siendo $N = 0^\circ$ y $E = 90^\circ$.

Posteriormente, en el menú desplegable "Geometría", habrá que seleccionar la geometría para la que vamos a realizar la simulación. Tenemos 9 opciones, 3 geometrías (align, desal, trap) y 3 separaciones entre dispositivos (2D, 4D y 6D), siendo $D=100$ m.

A continuación, habrá que introducir el rango de funcionamiento de los dispositivos, es decir, el rango de alturas de ola dentro del cual los WECs son capaces de producir energía. Si no se introduce rango el programa considerará que el dispositivo puede producir energía para cualquier altura.

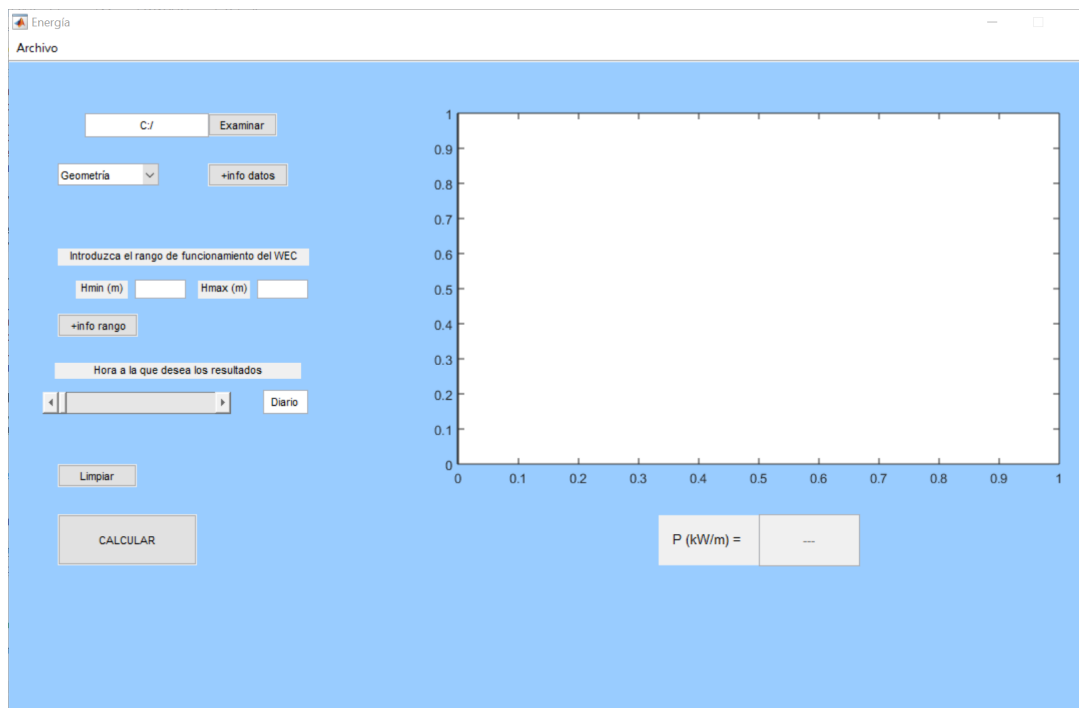
Una vez introducidos todos los datos, le damos al botón calcular, y obtendremos una cosa como esta.



En cada dispositivo se muestra la P (kW/m) producida. En el recuadro inferior se obtiene la suma de la producción de los 9 dispositivos. Mediante la barra deslizante se puede cambiar a la hora a la que se desea visualizar los resultados, que por defecto está en producción diaria.

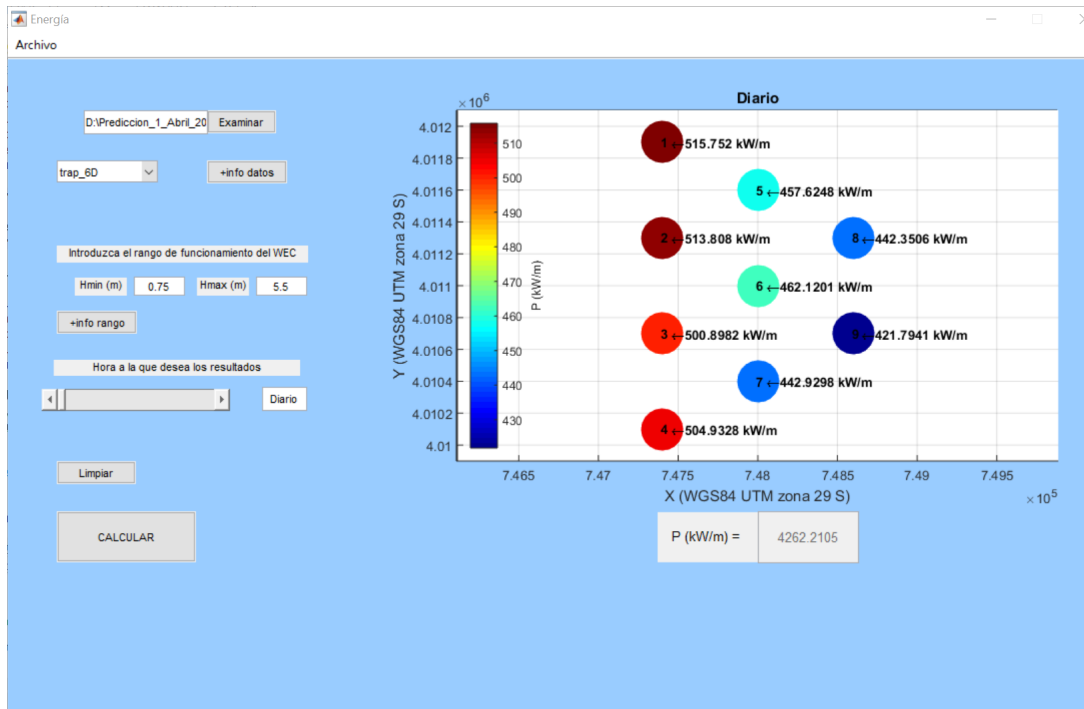
En la pestaña "Archivo", se incluyen las opciones que permiten exportar los resultados a una hoja de cálculo y la gráfica en pantalla a un documento pdf.

Cálculo mediante inserción desde hoja de cálculo



En este apartado, para facilitar el manejo del programa se introduce la predicción de oleaje mediante una hoja de Excel. En ella, habrá que introducir, la hora de la predicción en la columna 1 (en formato número entero, es decir 0,1,2,...23), la altura de ola significativa en m en la columna 2, el período de pico en segundos en la columna 3, y la dirección de procedencia del oleaje en la columna 4, siendo $N = 0^\circ$ y $E = 90^\circ$. El tope máximo a introducir de predicción es 24 h. Mediante la pestaña "Examinar" cargamos la hoja de cálculo en el programa.

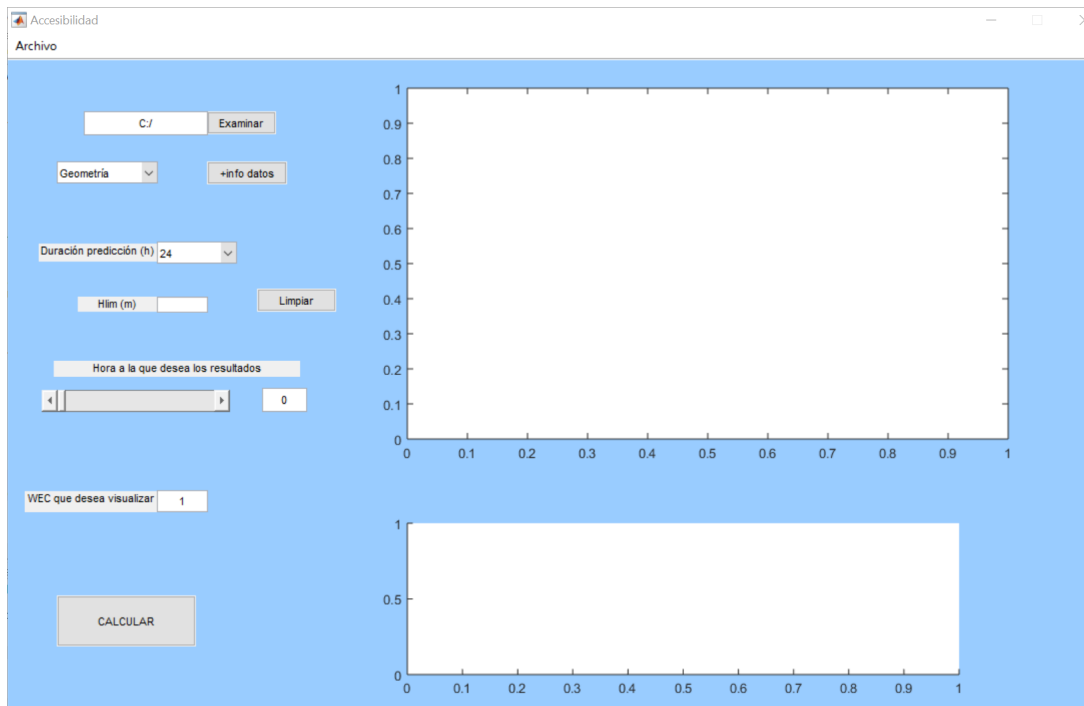
Luego, igual que en la sección anterior, habrá que introducir la geometría y el rango de funcionamiento, y mediante la barra deslizante visualizar los resultados a la hora deseada.



En la pestaña "Archivo", se incluyen las opciones que permiten exportar los resultados a una hoja de cálculo y la gráfica en pantalla a un documento pdf.

A.2.2 Accesibilidad

Esta sección está relacionada con el mantenimiento de la granja, ya que evalúa a partir de la predicción introducida a qué horas será accesible cada dispositivo.



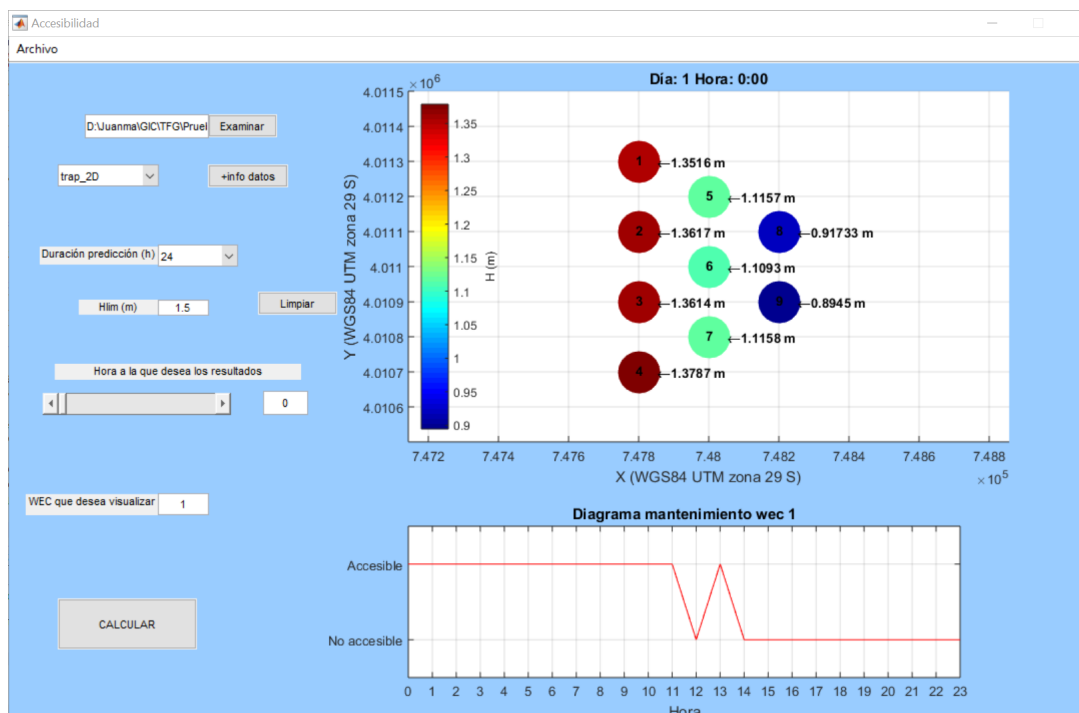
Al igual que en el apartado anterior, en este módulo habrá que introducir la predicción mediante una hoja de Excel, en el mismo formato ya descrito. La única diferencia es que en este caso permite hacer una simulación mayor a 24 h (24,48 y 72 h). Por tanto, en la columna 1 de la hoja de cálculo habrá que introducir la hora de la predicción en formato número entero, es decir 0,1,2...,23,24,25,...,50,...71 h.

Luego, al igual que en los casos anteriores, habrá que introducir la geometría, y también introduciremos la duración de la predicción (24, 48 o 72 h), y la altura límite, es decir, la altura de oleaje a partir de la cual no se puede navegar.

En el gráfico superior, lo que observamos es la altura de ola en cada dispositivo, y si no son accesibles éstos están marcados con una cruz roja. Al igual que antes, en la barra deslizante podremos escoger la hora a la que se desea visualizar los resultados.

En el gráfico inferior observamos el diagrama para cada dispositivo (pudiendo cambiar el dispositivo para el cual deseamos verlo), que indica a qué horas es accesible.

Al igual que antes, podemos exportar los resultados a una hoja de excel y las gráficas en pantalla a formato pdf.



Apéndice B

Compendio de figuras

En este anexo se hace una recopilación de el resto de gráficas y figuras no mostradas a lo largo del documento.

B.1 Energía

B.1.1 Producción anual

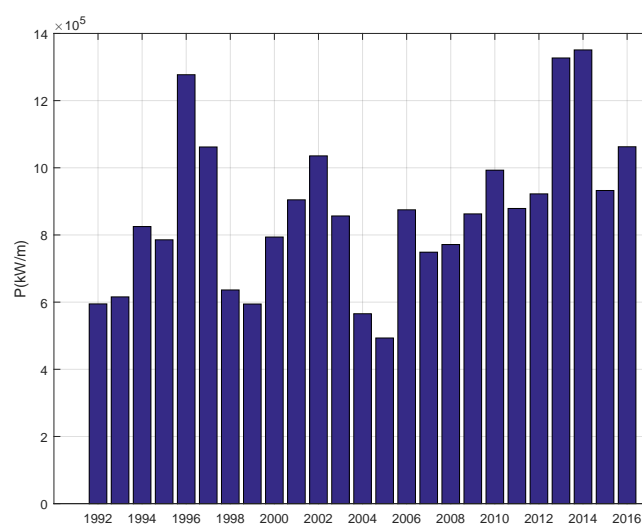


Figura B.1 Producción anual distribución trap2D.

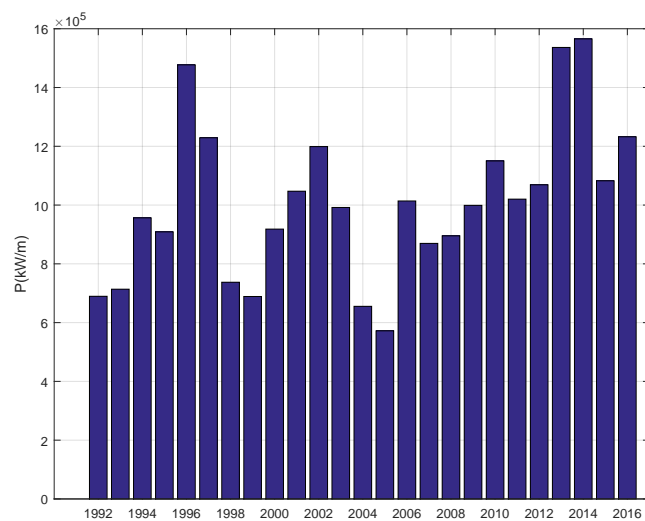


Figura B.2 Producción anual distribución trap4D.

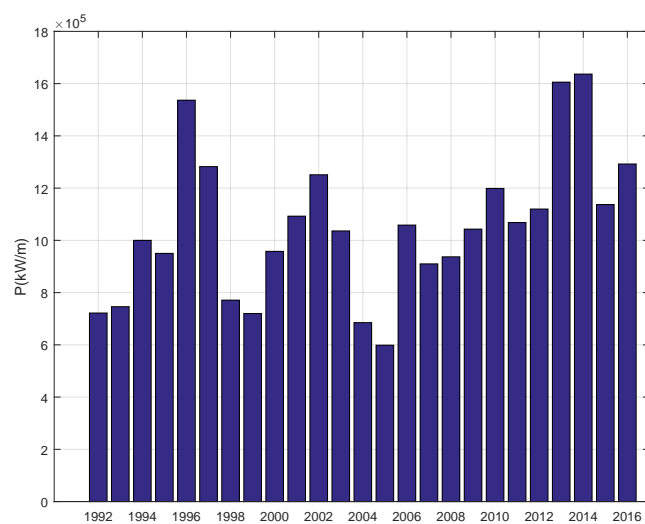


Figura B.3 Producción anual distribución trap6D.

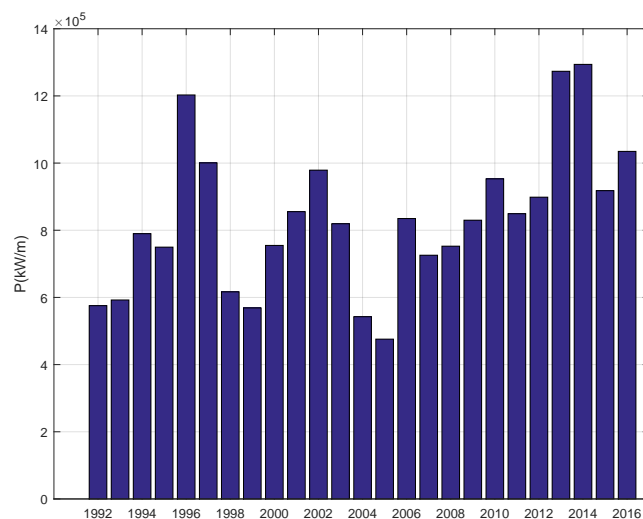


Figura B.4 Producción anual distribución align2D.

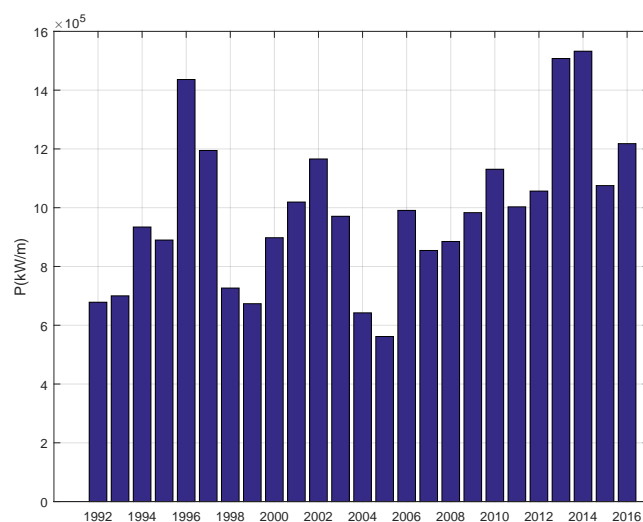


Figura B.5 Producción anual distribución align4D.

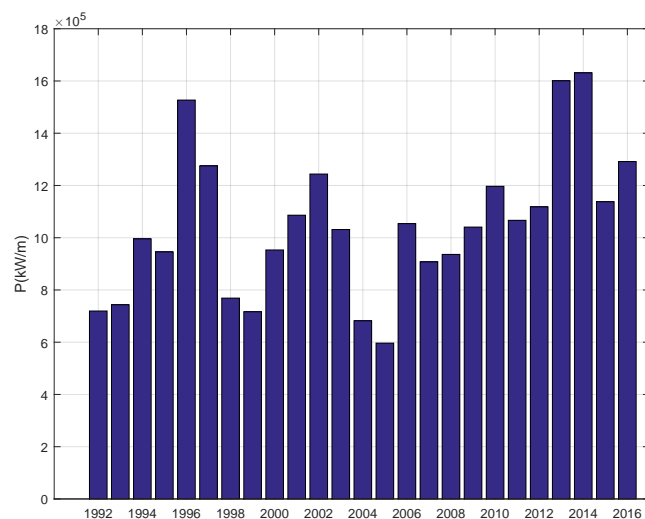


Figura B.6 Producción anual distribución align6D.

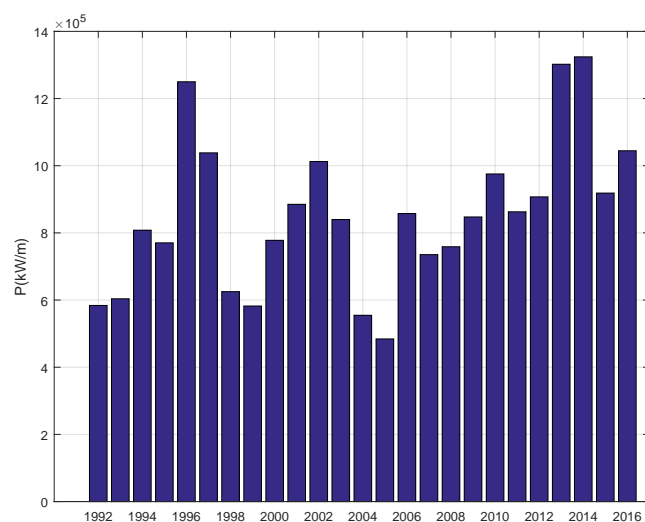


Figura B.7 Producción anual distribución desal2D.

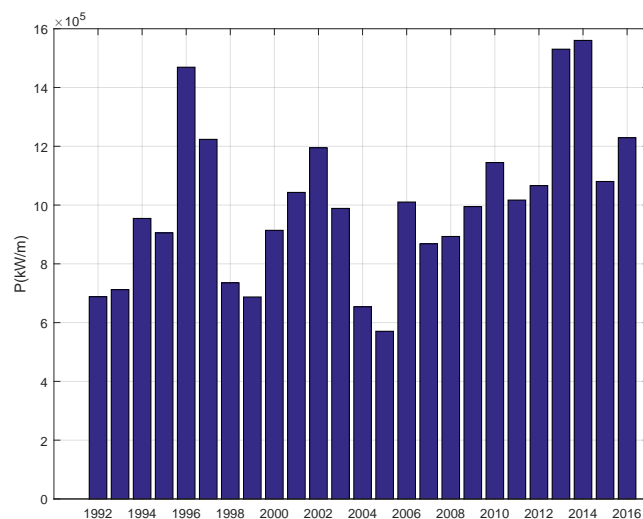


Figura B.8 Producción anual distribución desal4D.

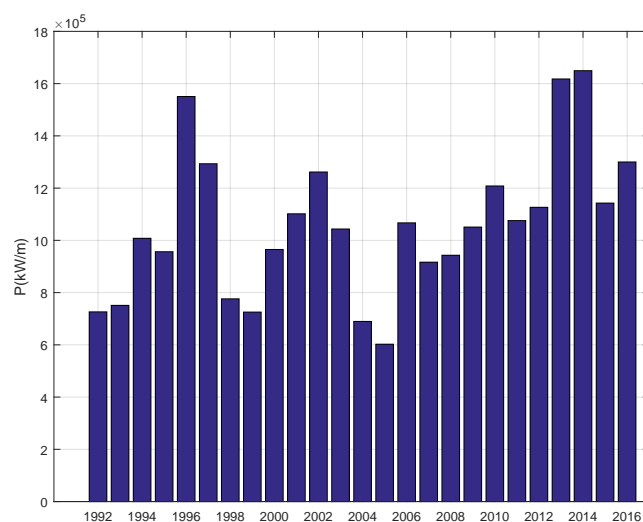


Figura B.9 Producción anual distribución desal6D.

Producción estacional

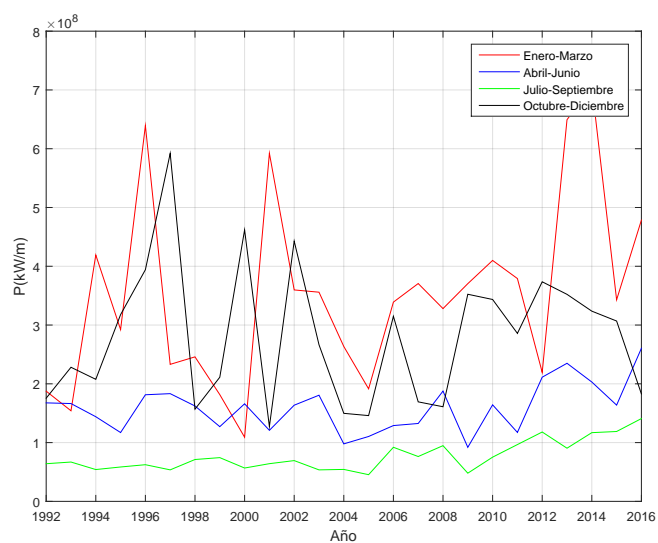


Figura B.10 Producción por meses distribución trap2D.

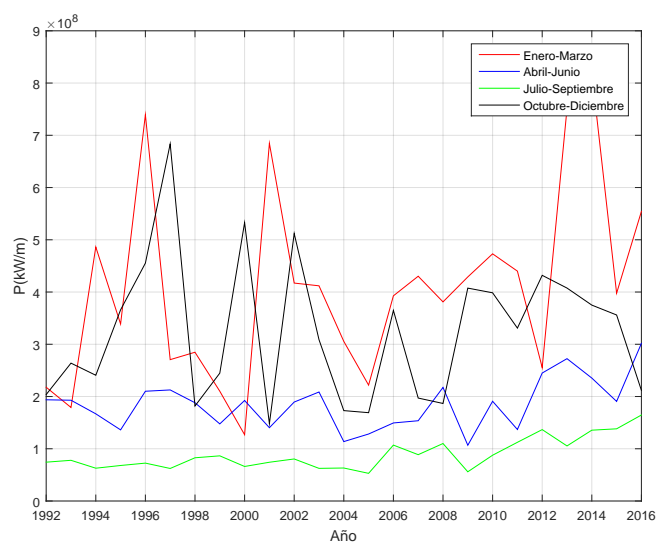


Figura B.11 Producción por meses distribución trap4D.

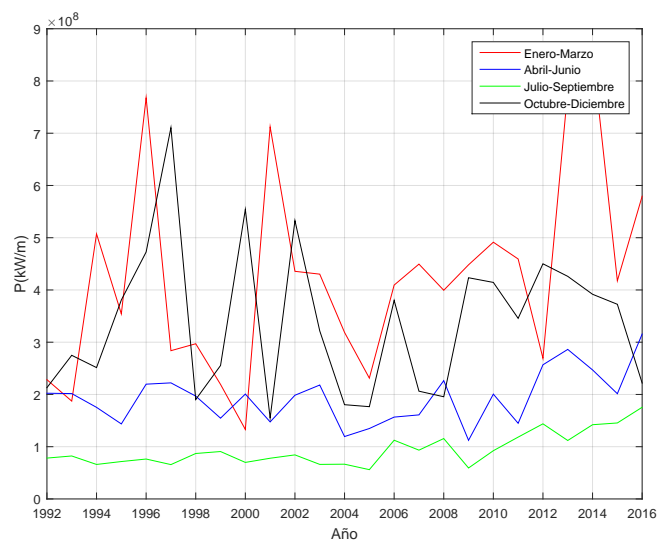


Figura B.12 Producción por meses distribución trap6D.

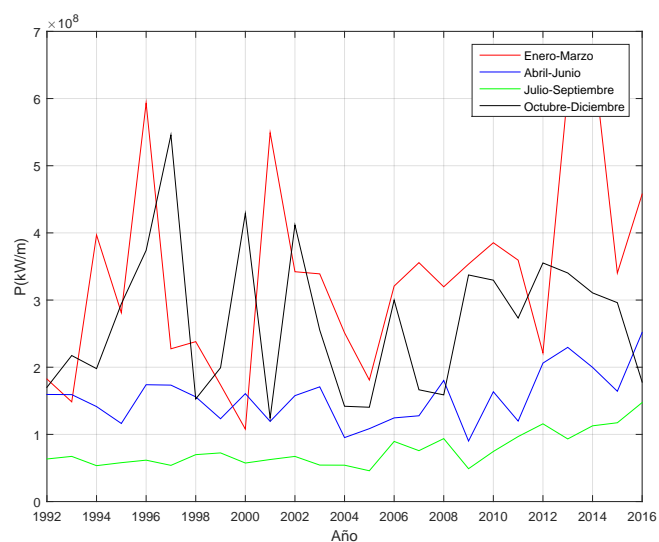


Figura B.13 Producción por meses distribución align2D.

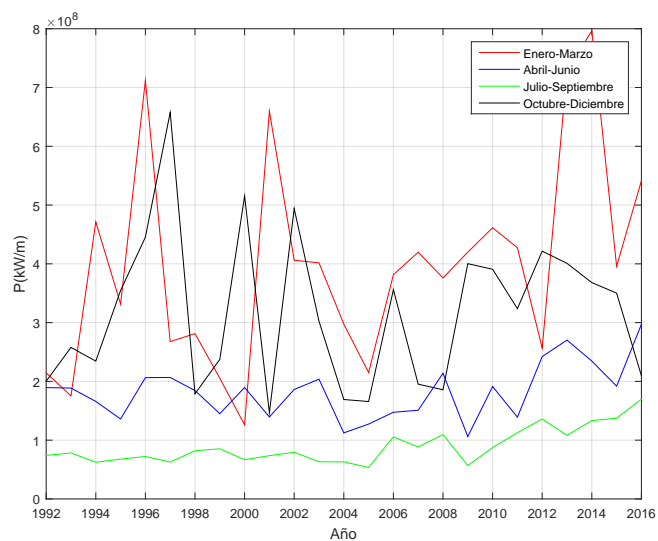


Figura B.14 Producción por meses distribución align4D.

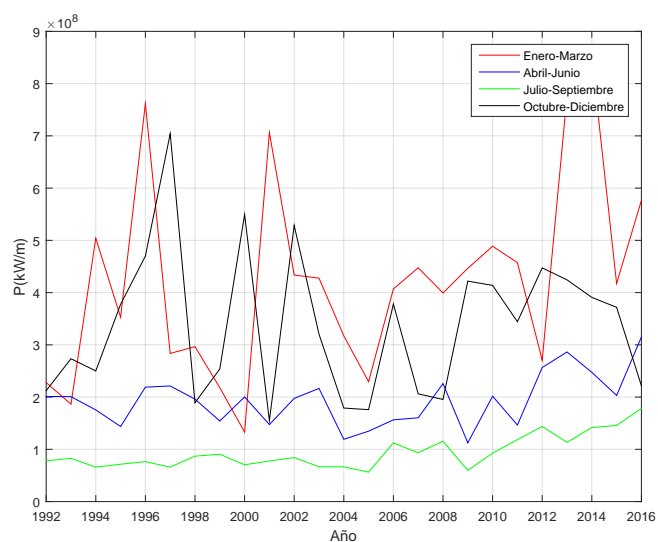


Figura B.15 Producción por meses distribución align6D.

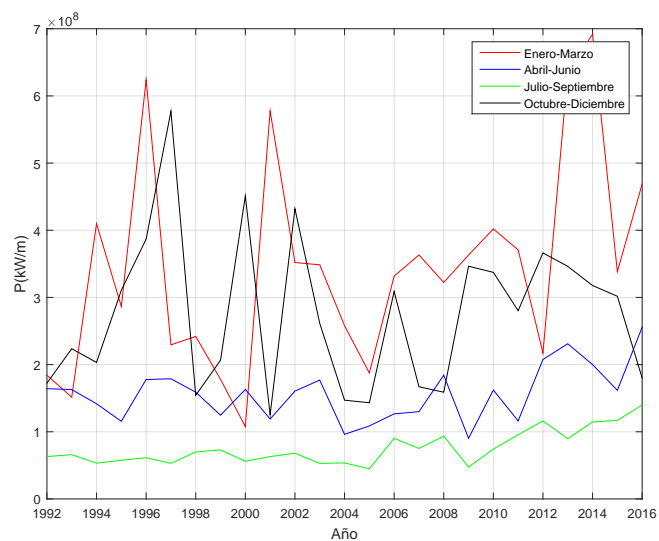


Figura B.16 Producción por meses distribución desal2D.

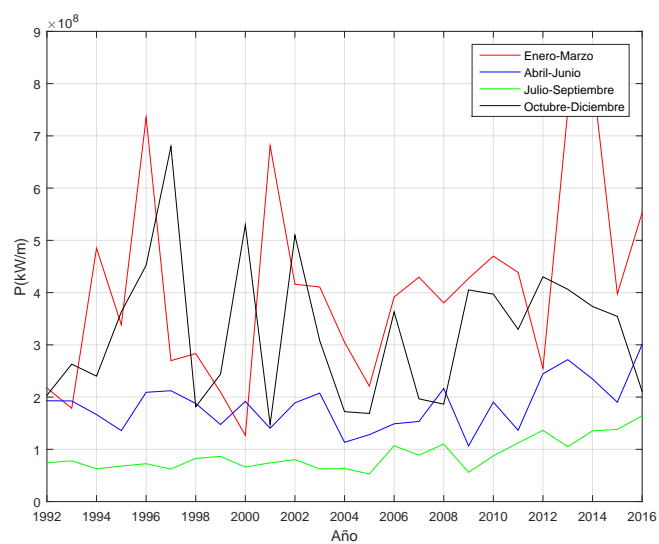


Figura B.17 Producción por meses distribución desal4D.

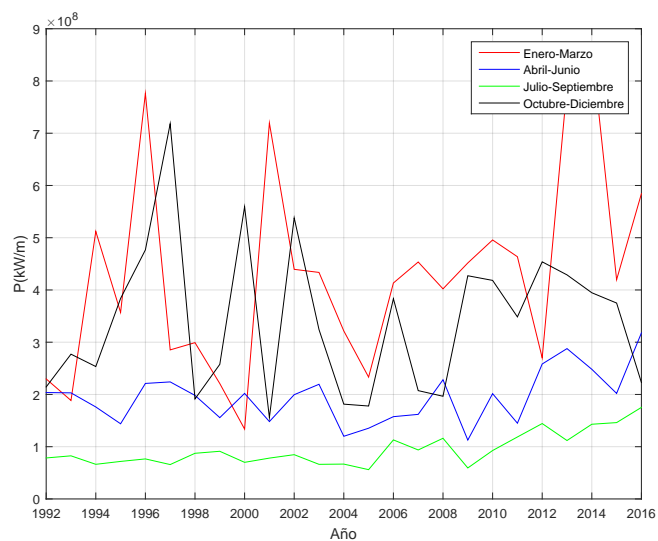


Figura B.18 Producción por meses distribución desal6D.

B.1.2 Producción y direccionalidad

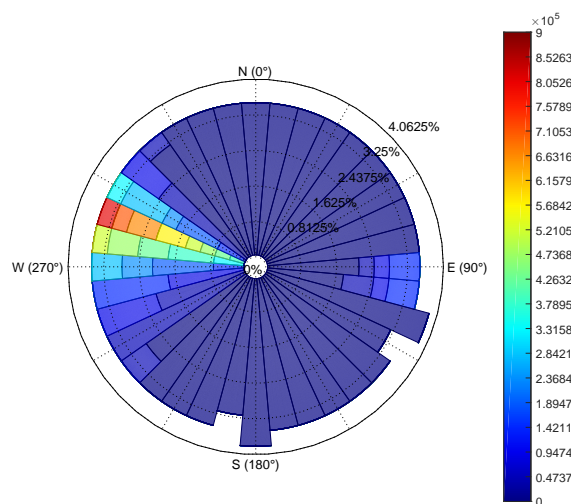


Figura B.19 $P(\text{kW/m})$ acumulada por dirección distribución trap2D.

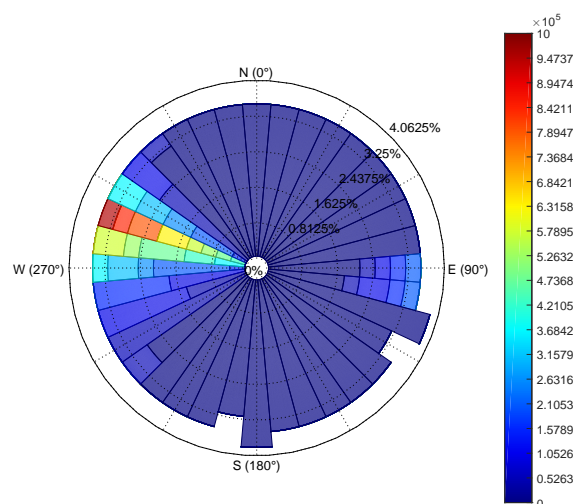


Figura B.20 $P(\text{kW/m})$ acumulada por dirección distribución trap4D.

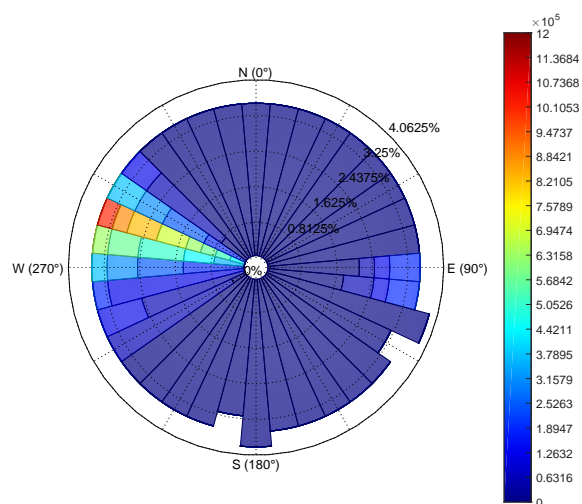


Figura B.21 $P(\text{kW/m})$ acumulada por dirección distribución trap6D.

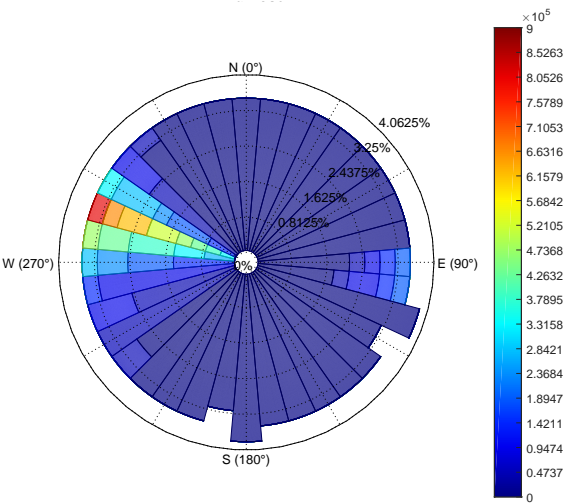


Figura B.22 $P(\text{kW/m})$ acumulada por dirección distribución align2D.

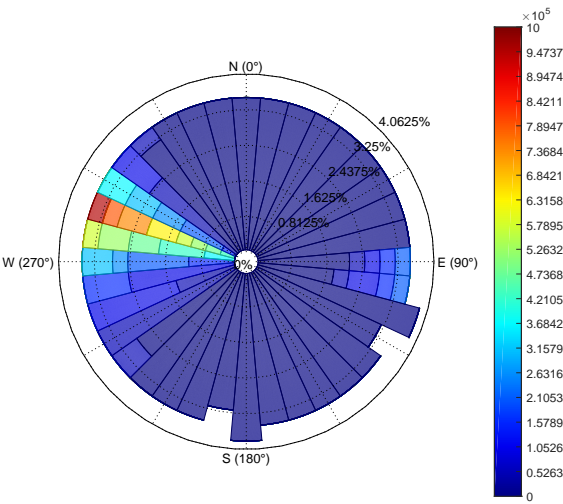


Figura B.23 $P(\text{kW/m})$ acumulada por dirección distribución align4D.

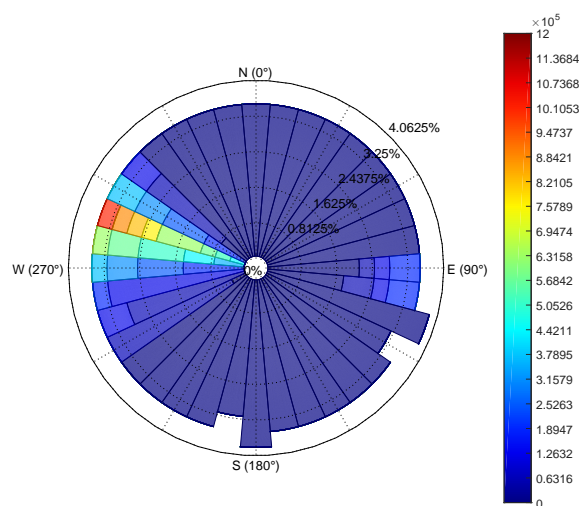


Figura B.24 P (kW/m) acumulada por dirección distribución align6D.

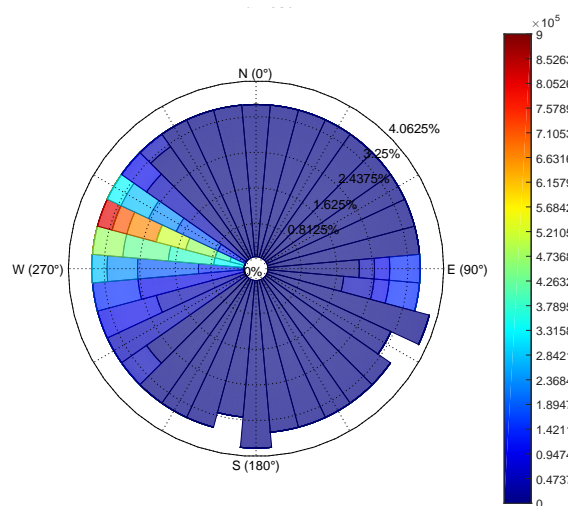


Figura B.25 P (kW/m) acumulada por dirección distribución desal2D.

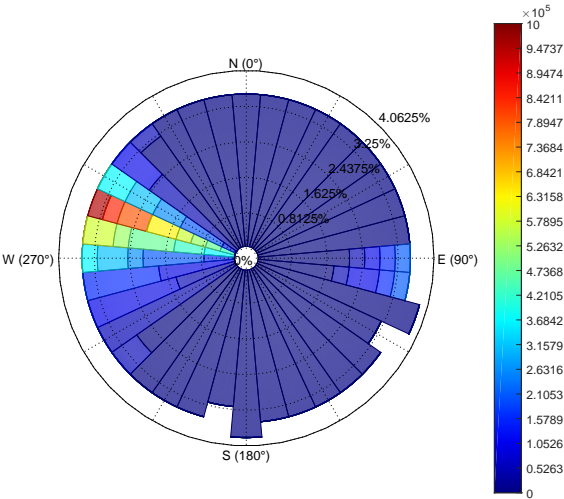


Figura B.26 P (kW/m) acumulada por dirección distribución desal4D.

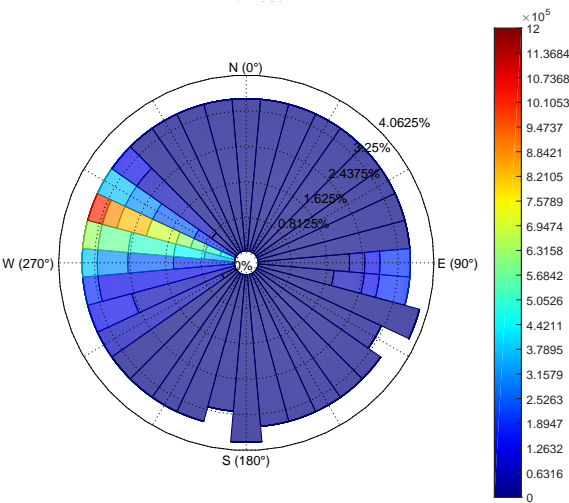


Figura B.27 P (kW/m) acumulada por dirección distribución desal6D.

B.1.3 Direccionalidad y Qfactor

Align-2D

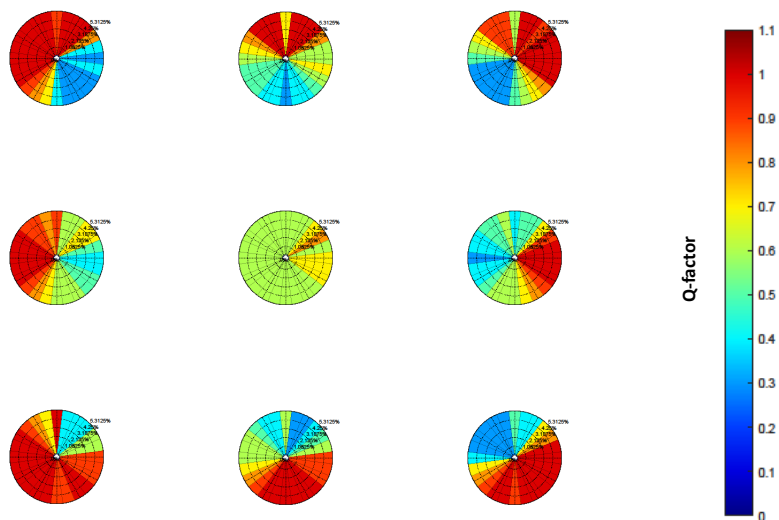


Figura B.28 Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución align2D.

Align-4D

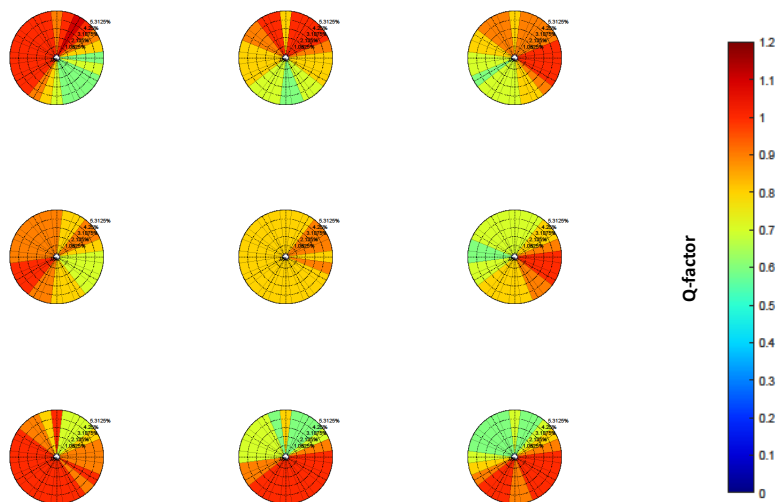


Figura B.29 Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución align4D.

Align-6D

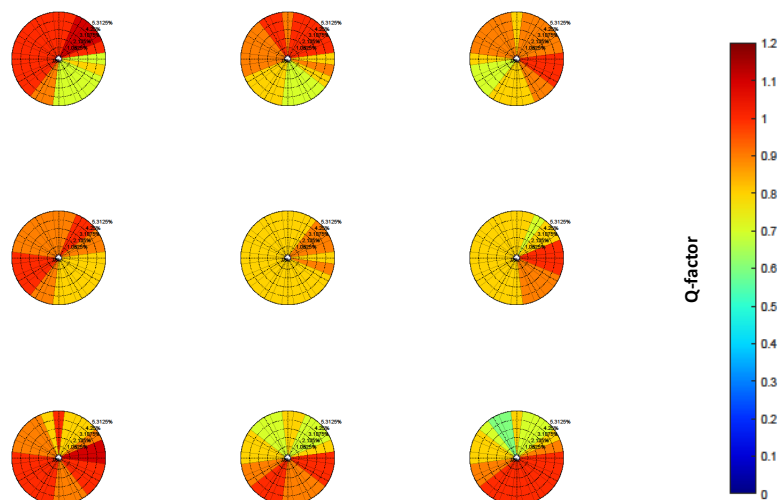


Figura B.30 Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución align6D.

Desal-2D

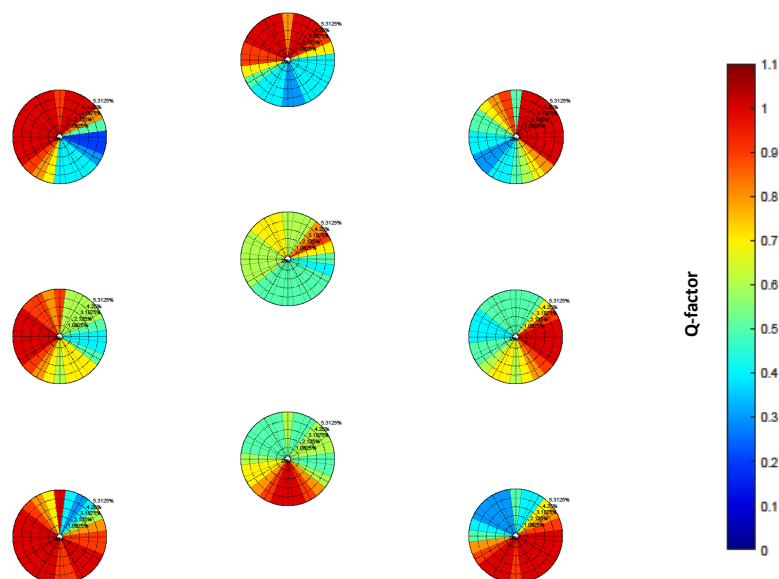


Figura B.31 Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución desal2D.

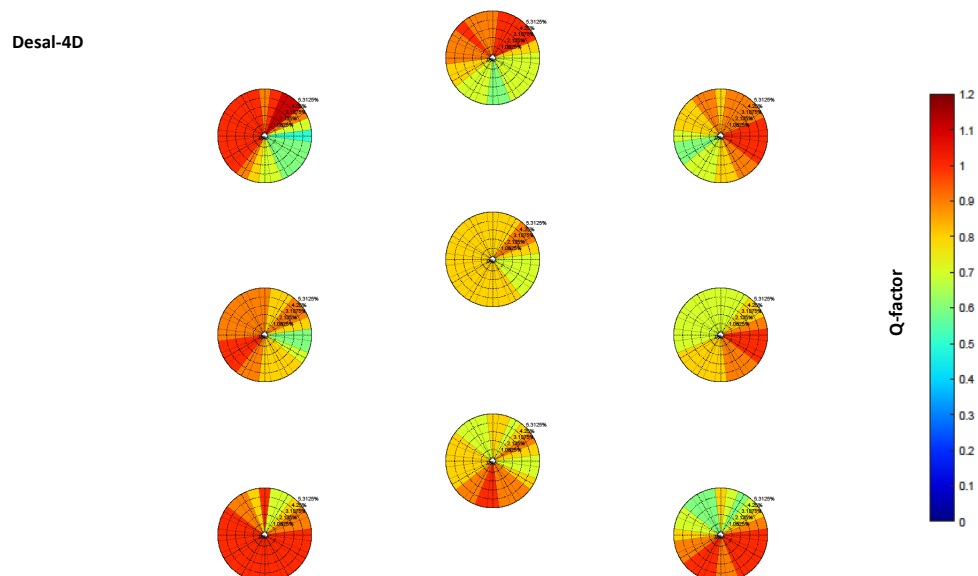


Figura B.32 Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución desal4D.

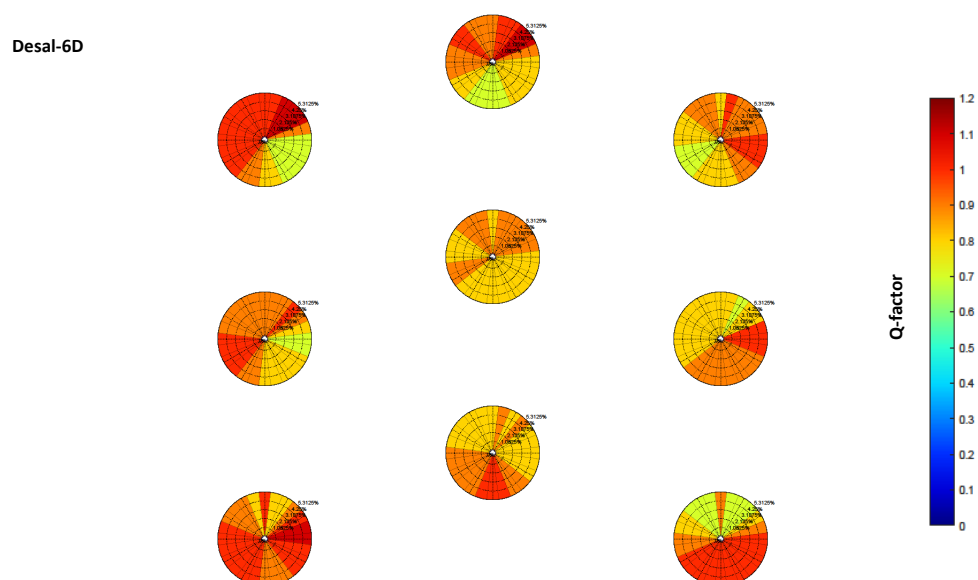


Figura B.33 Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución desal6D.

Trap-2D

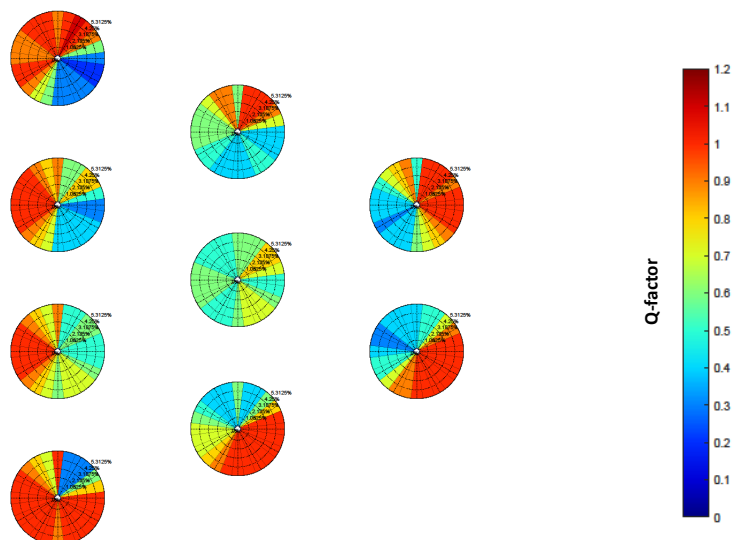


Figura B.34 Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución trap2D.

Trap-4D

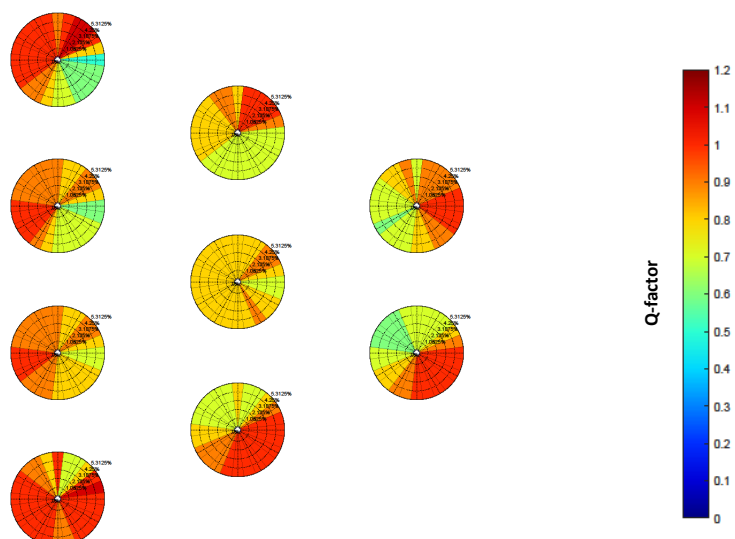


Figura B.35 Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución trap4D.

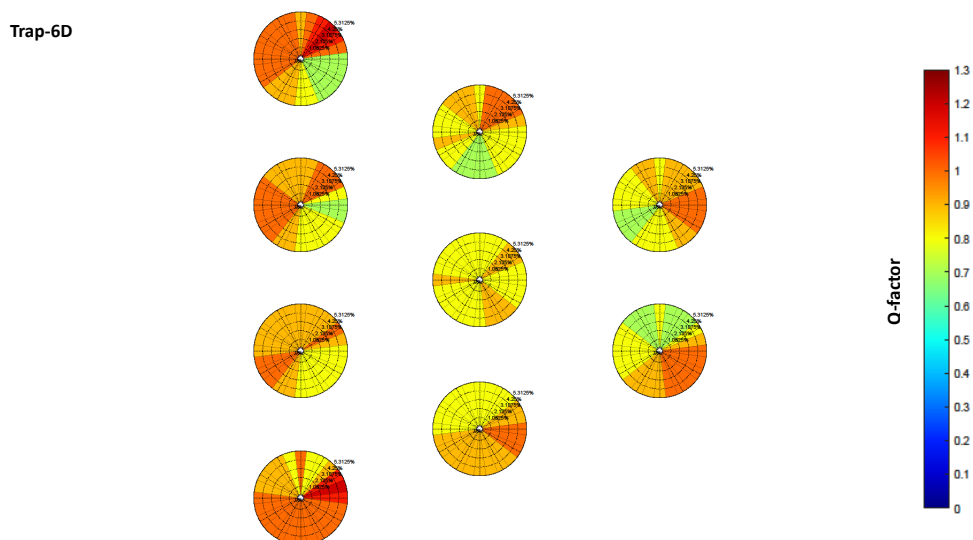
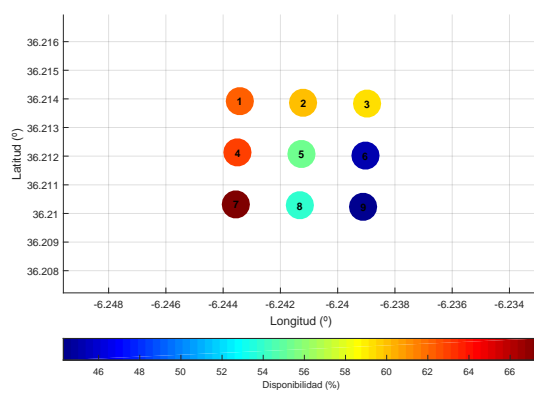


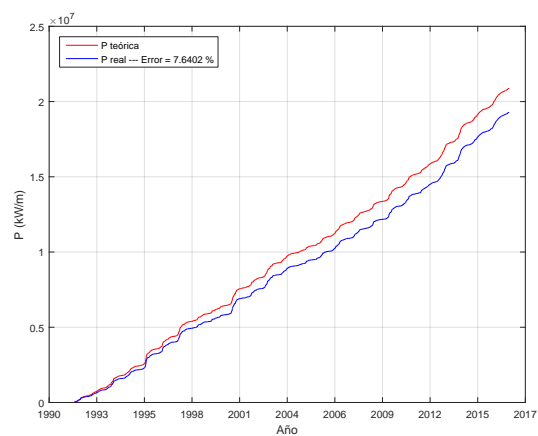
Figura B.36 Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución trap6D.

B.2 Mantenimiento

Disponibilidad

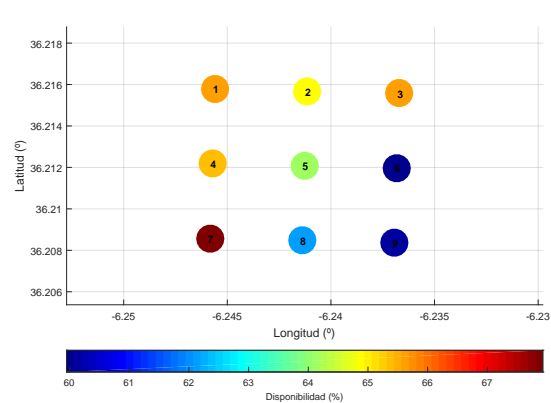


(a) Disponibilidad.

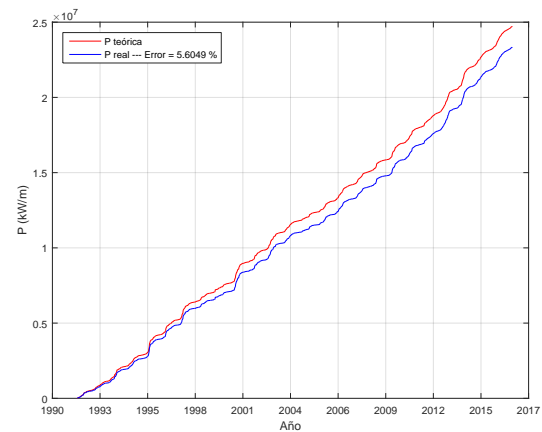


(b) Producción real.

Figura B.37 Disponibilidad distribución alineada 2D.

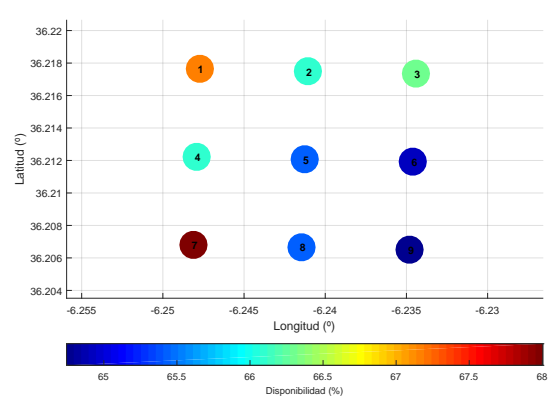


(a) Disponibilidad.

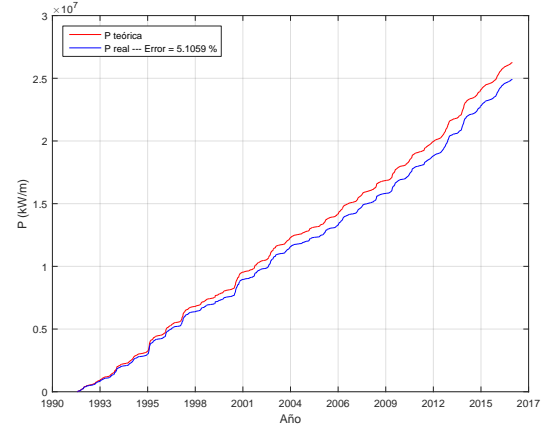


(b) Producción real.

Figura B.38 Disponibilidad distribución alineada 4D.

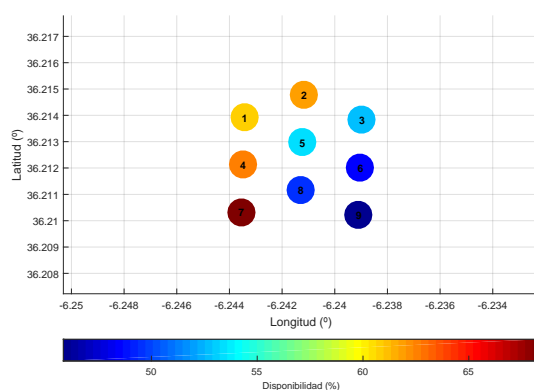


(a) Disponibilidad.

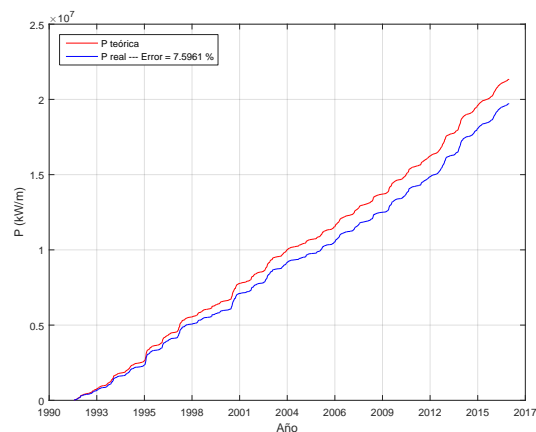


(b) Producción real.

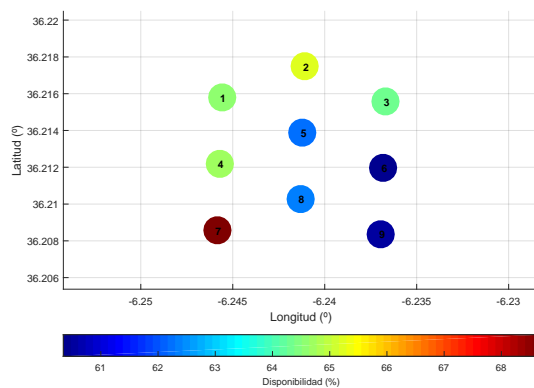
Figura B.39 Disponibilidad distribución alineada 6D.



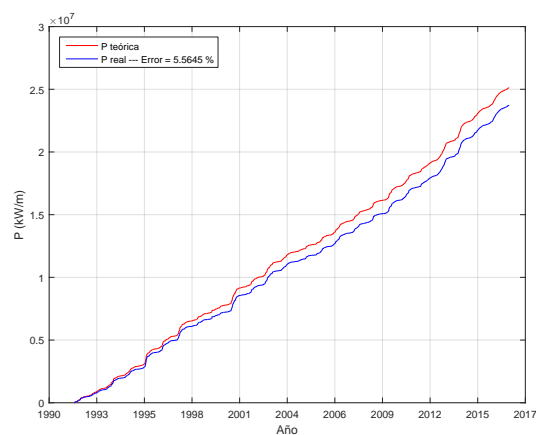
(a) Disponibilidad.



(b) Producción real.

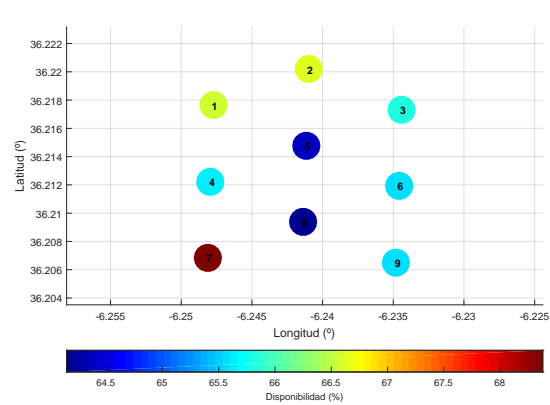
Figura B.40 Disponibilidad distribución desalineada 2D.

(a) Disponibilidad.

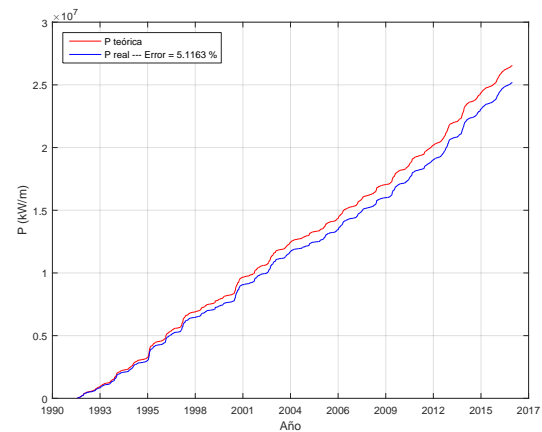


(b) Producción real.

Figura B.41 Disponibilidad distribución desalineada 4D.

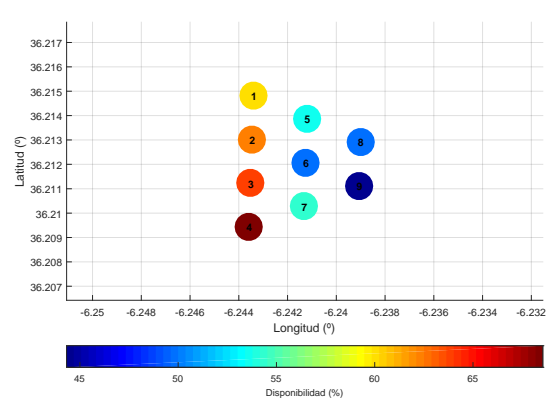


(a) Disponibilidad.

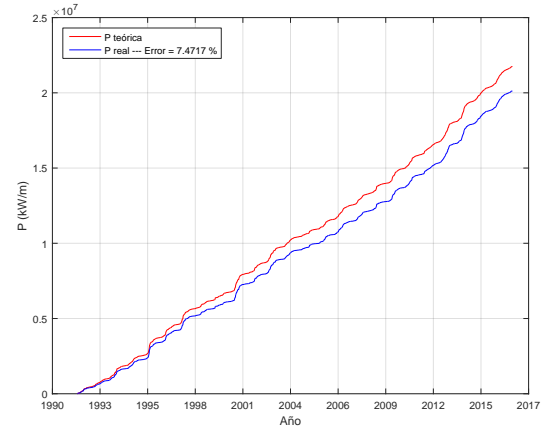


(b) Producción real.

Figura B.42 Disponibilidad distribución desalineada 6D.

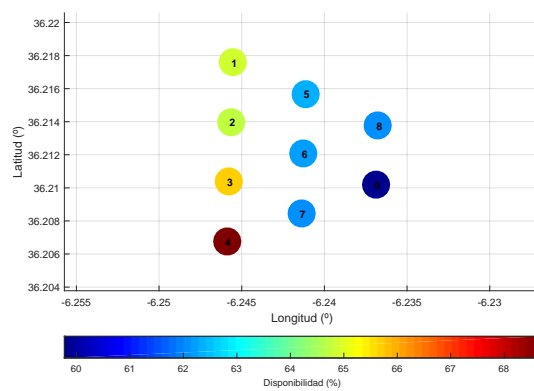


(a) Disponibilidad.

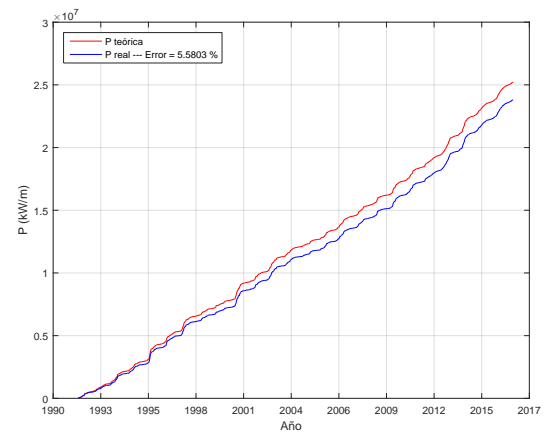


(b) Producción real.

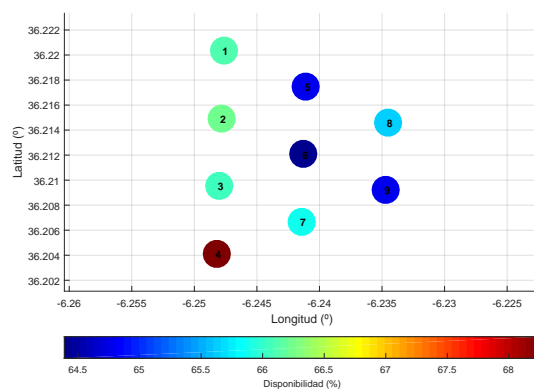
Figura B.43 Disponibilidad distribución trapezoidal 2D.



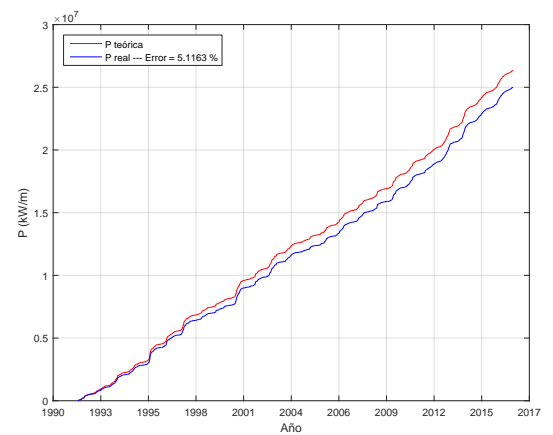
(a) Disponibilidad.



(b) Producción real.

Figura B.44 Disponibilidad distribución trapezoidal 4D.

(a) Disponibilidad.



(b) Producción real.

Figura B.45 Disponibilidad distribución trapezoidal 6D.

Accesibilidad

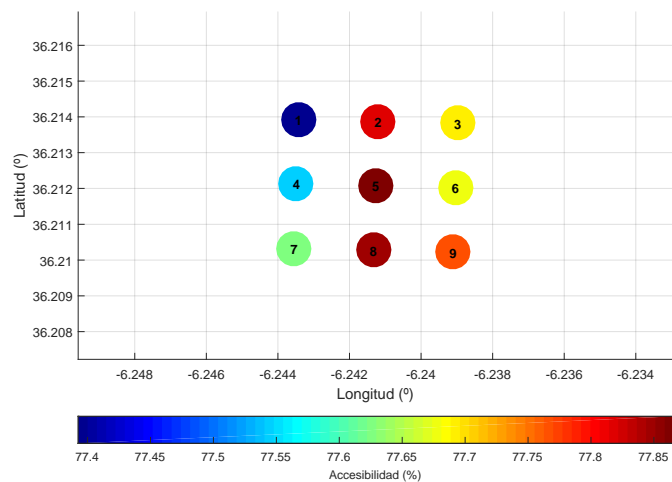


Figura B.46 Accesibilidad distribución alineada (2D).

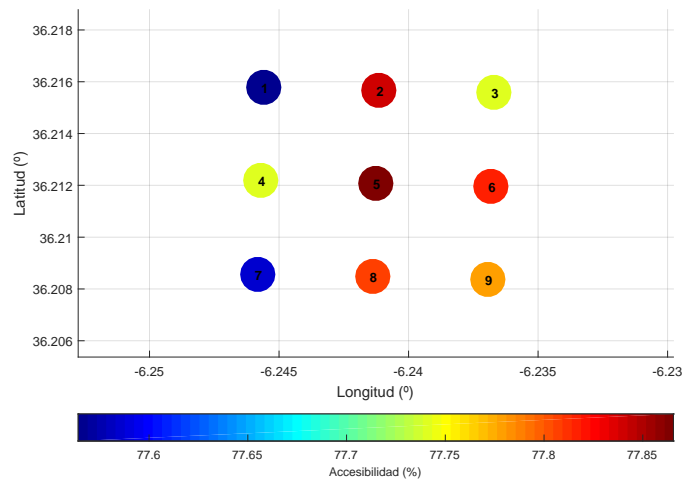


Figura B.47 Accesibilidad distribución alineada (4D).

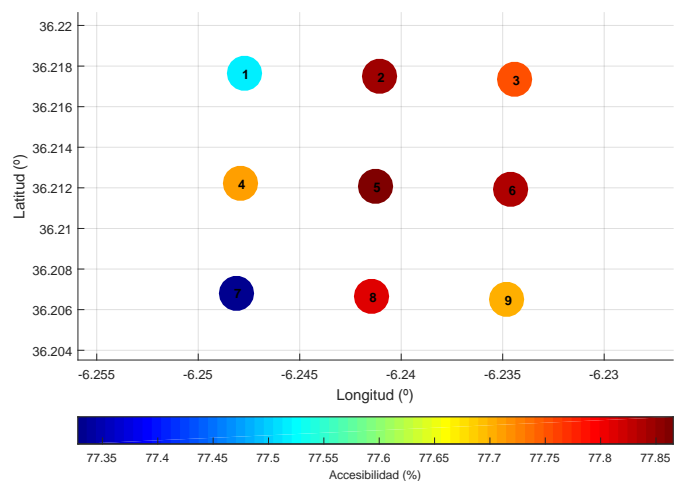


Figura B.48 Accesibilidad distribución alineada (6D).

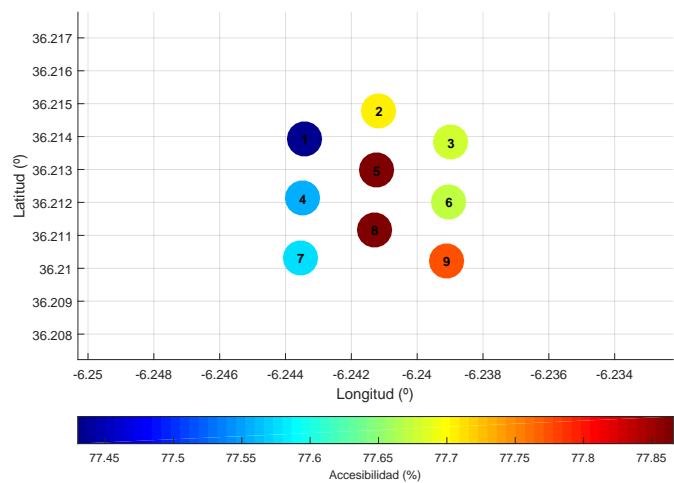


Figura B.49 Accesibilidad distribución desalineada (2D).

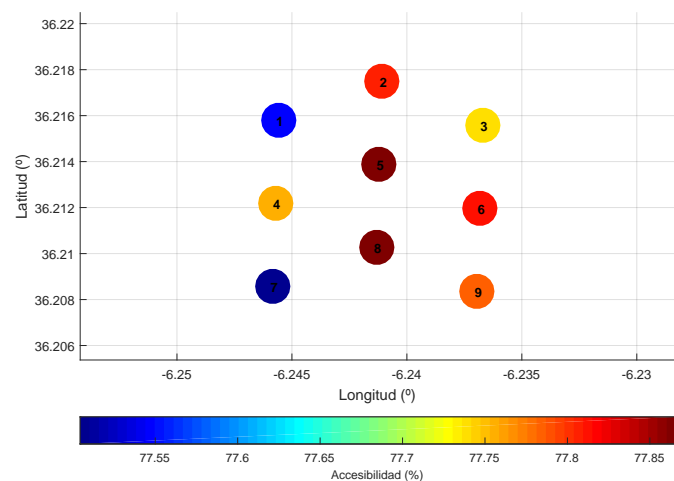


Figura B.50 Accesibilidad distribución desalineada (4D).

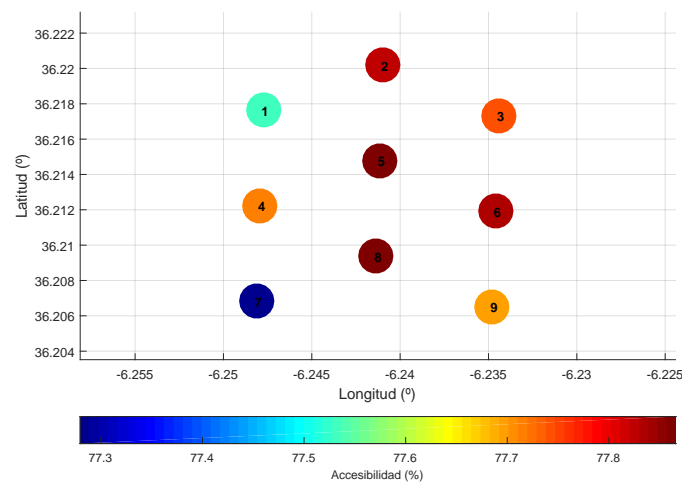


Figura B.51 Accesibilidad distribución desalineada (6D).

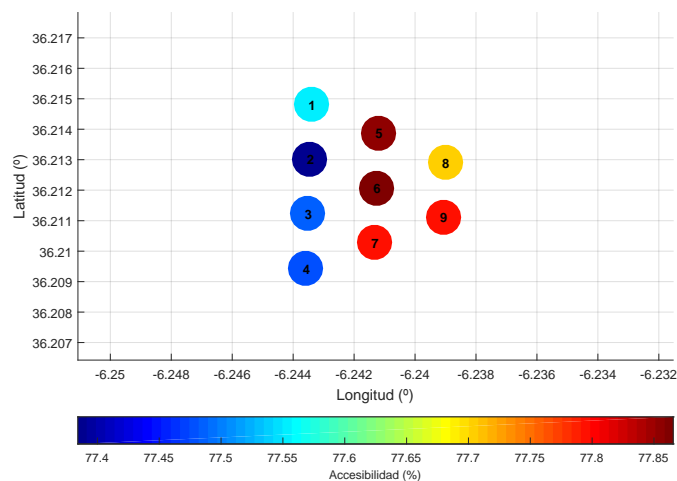


Figura B.52 Accesibilidad distribución trapezoidal (2D).

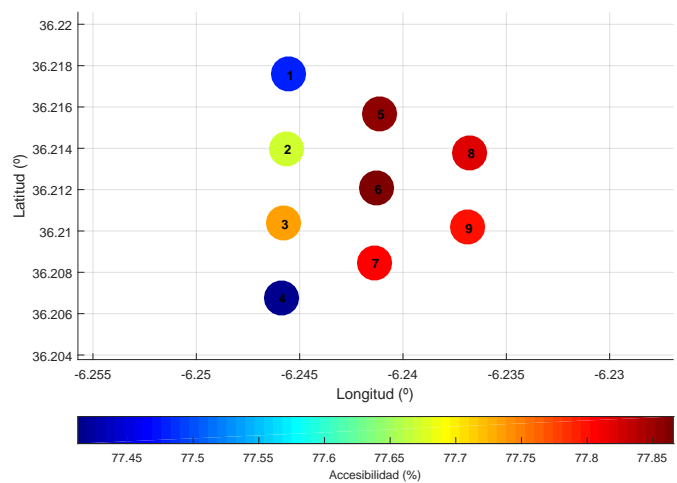


Figura B.53 Accesibilidad distribución trapezoidal (4D).

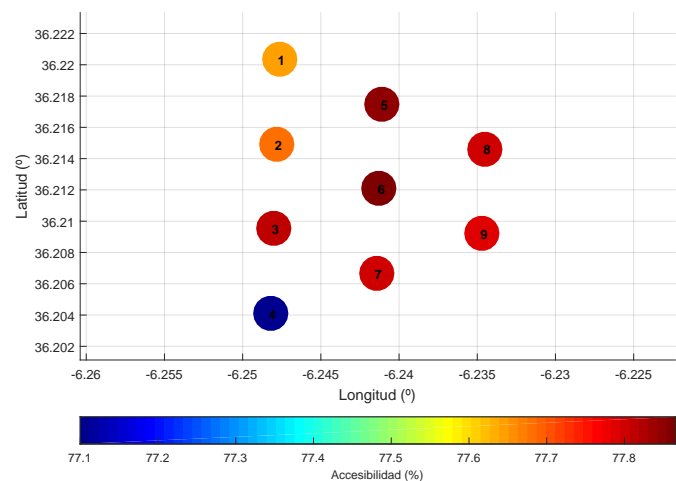


Figura B.54 Accesibilidad distribución trapezoidal (6D).

Tiempo medio de espera

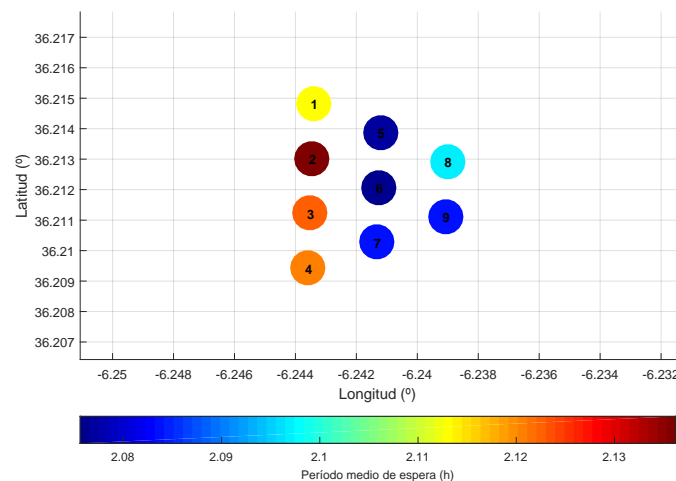


Figura B.55 Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 6 h).

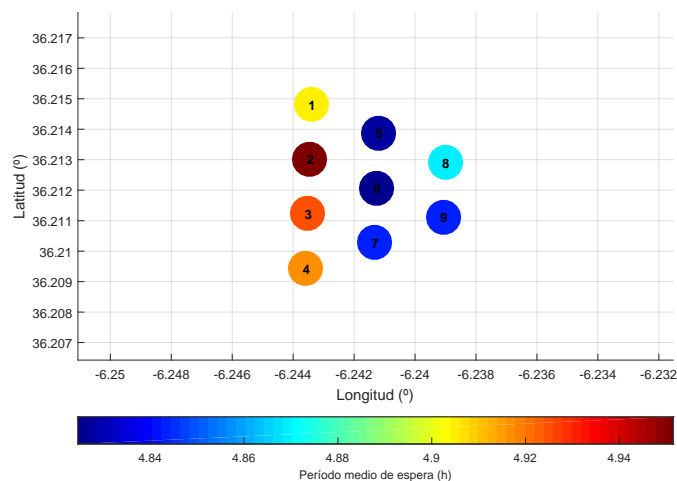


Figura B.56 Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 12 h).

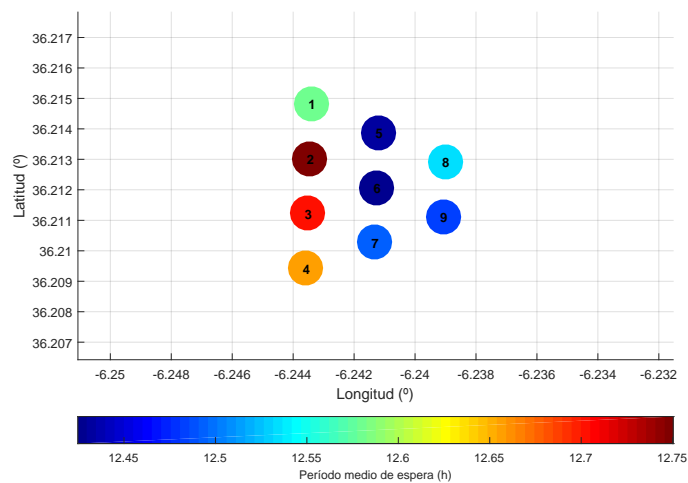


Figura B.57 Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 24 h).

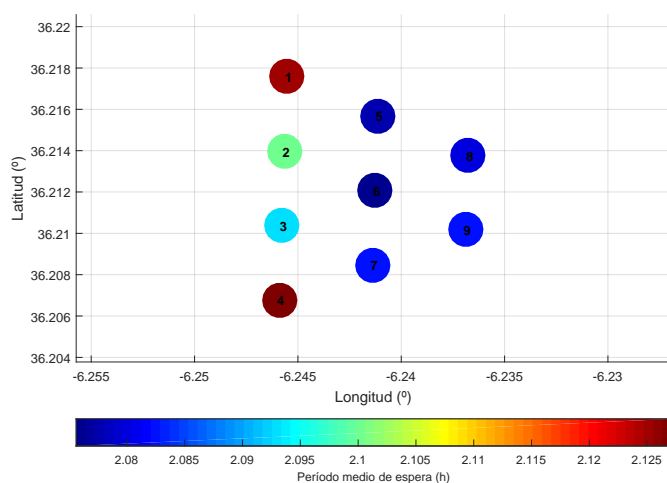


Figura B.58 Tiempo medio de espera distribución trap_4D (Ventana de 6 h).

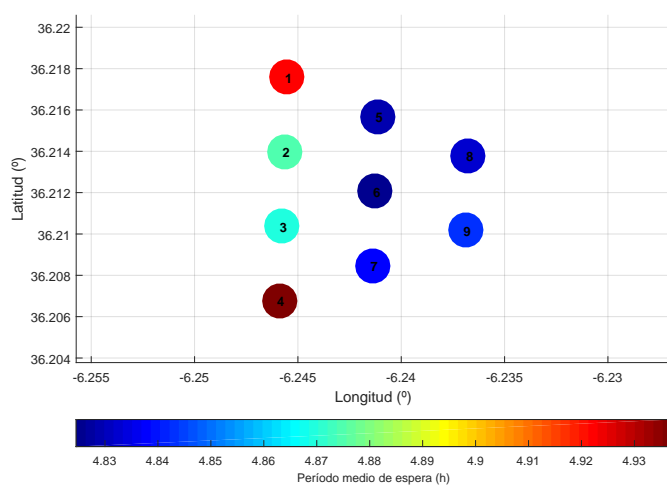


Figura B.59 Tiempo medio de espera distribución trap_4D (Ventana de 12 h).

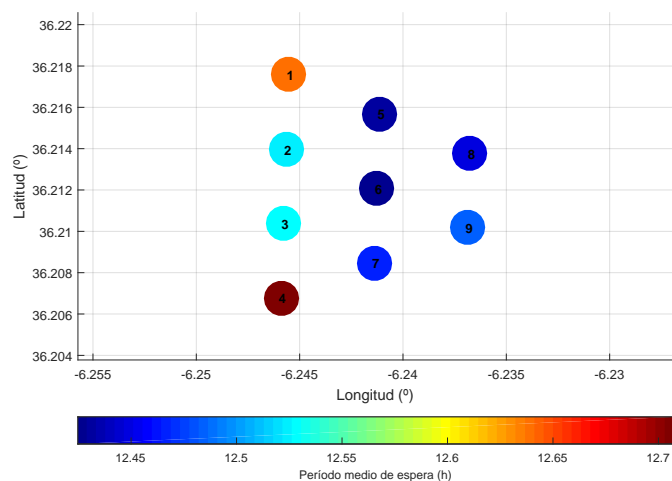


Figura B.60 Tiempo medio de espera distribución trap_4D (Ventana de 24 h).

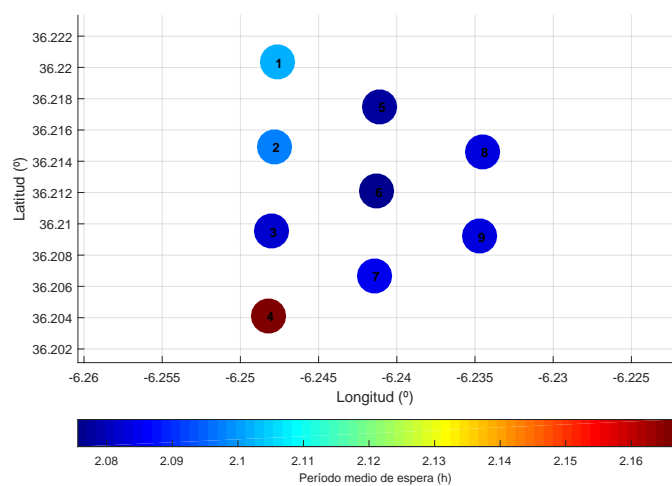


Figura B.61 Tiempo medio de espera distribución trap_6D (Ventana de 6 h).

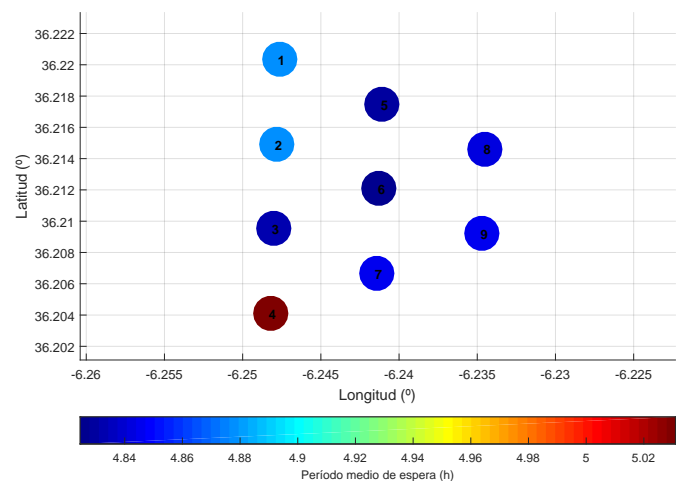


Figura B.62 Tiempo medio de espera distribución trap_6D (Ventana de 12 h).

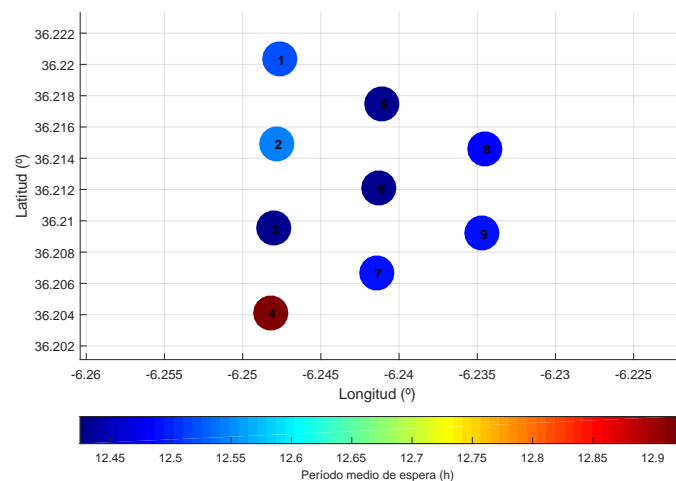


Figura B.63 Tiempo medio de espera distribución trap_6D (Ventana de 24 h).

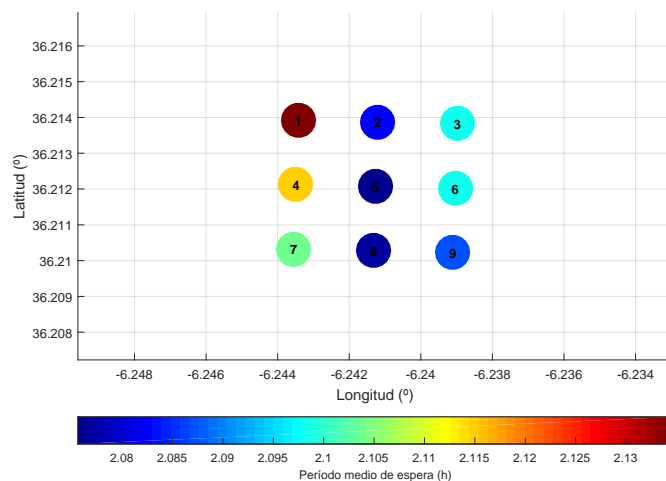


Figura B.64 Tiempo medio de espera distribución align_2D (Ventana de 6 h).

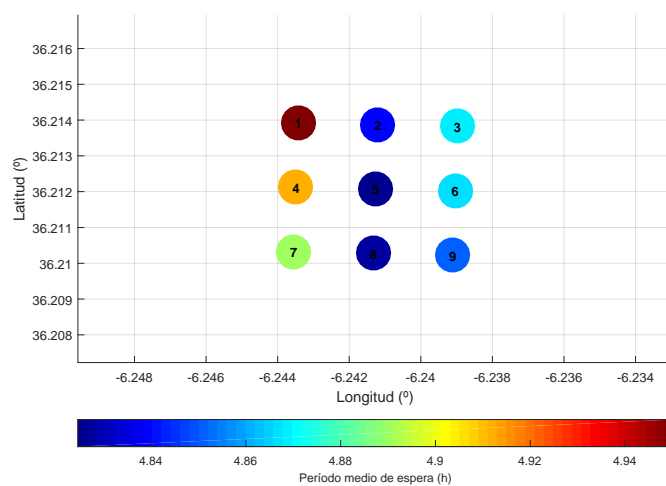


Figura B.65 Tiempo medio de espera distribución align_2D (Ventana de 12 h).

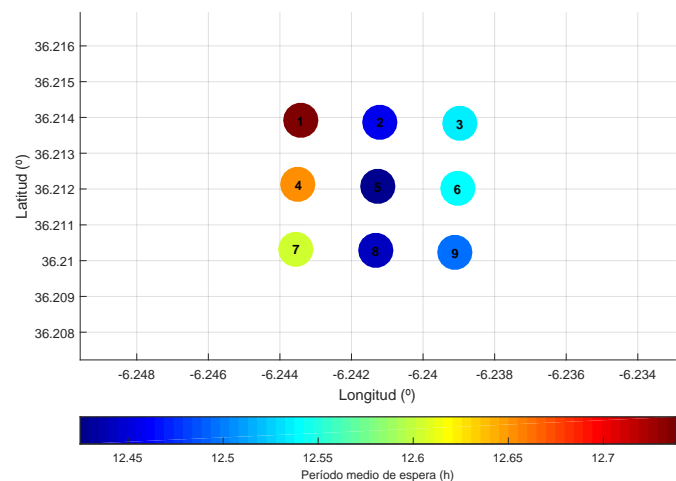


Figura B.66 Tiempo medio de espera distribución align_2D (Ventana de 24 h).

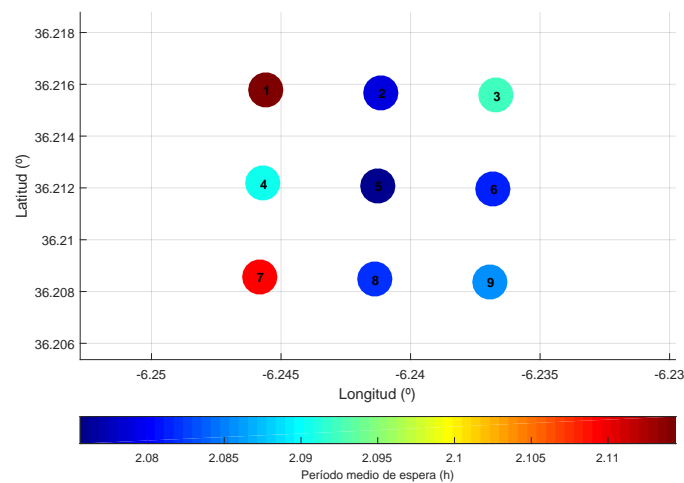


Figura B.67 Tiempo medio de espera distribución align_4D (Ventana de 6 h).

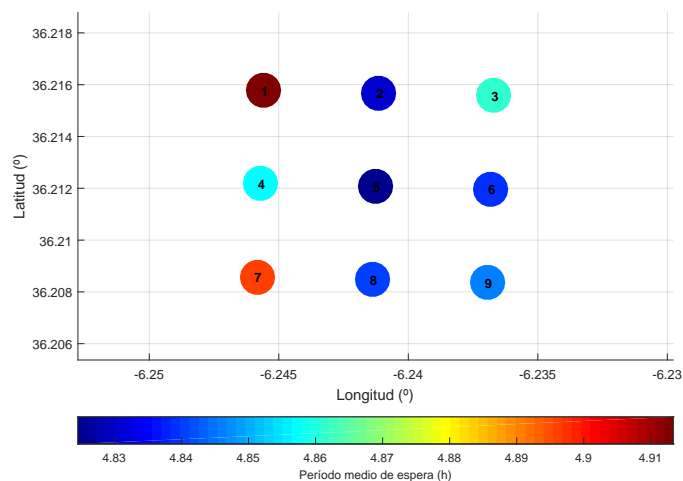


Figura B.68 Tiempo medio de espera distribución align_4D (Ventana de 12 h).

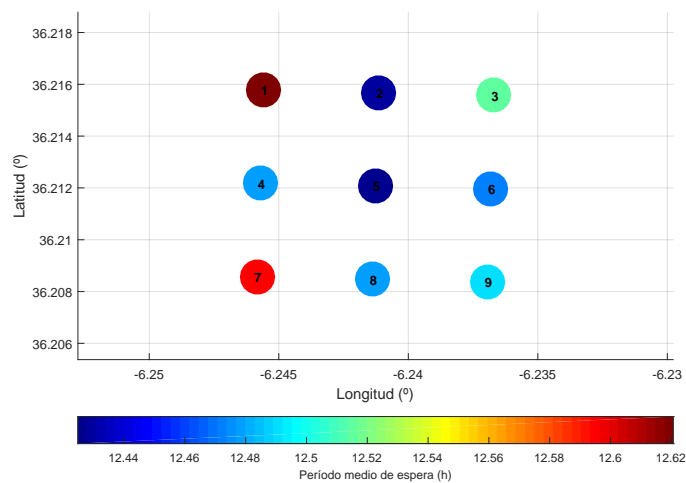


Figura B.69 Tiempo medio de espera distribución align_4D (Ventana de 24 h).

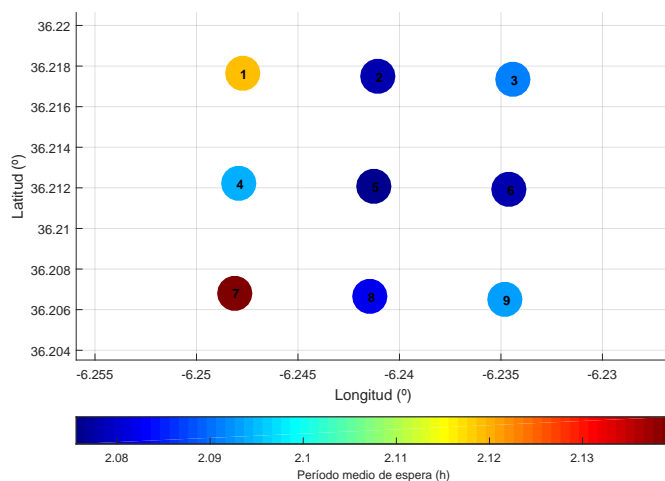


Figura B.70 Tiempo medio de espera distribución align_6D (Ventana de 6 h).

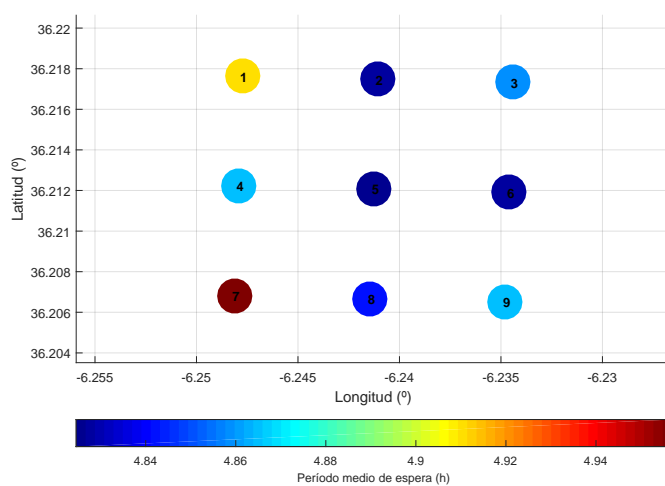


Figura B.71 Tiempo medio de espera distribución align_6D (Ventana de 12 h).

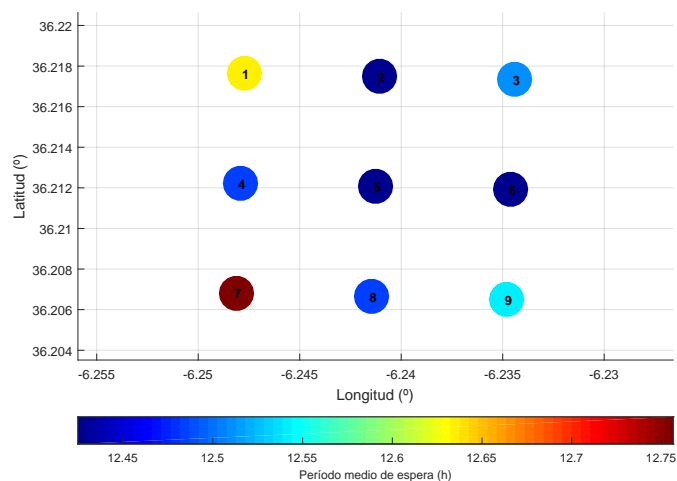


Figura B.72 Tiempo medio de espera distribución align_6D (Ventana de 24 h).

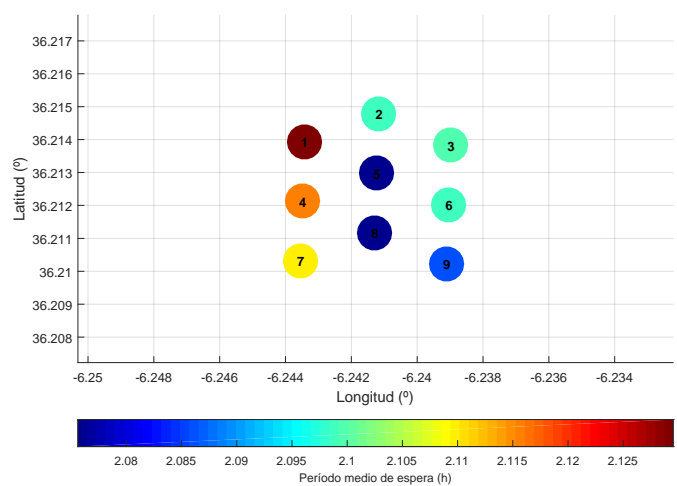


Figura B.73 Tiempo medio de espera distribución desal_2D (Ventana de 6 h).

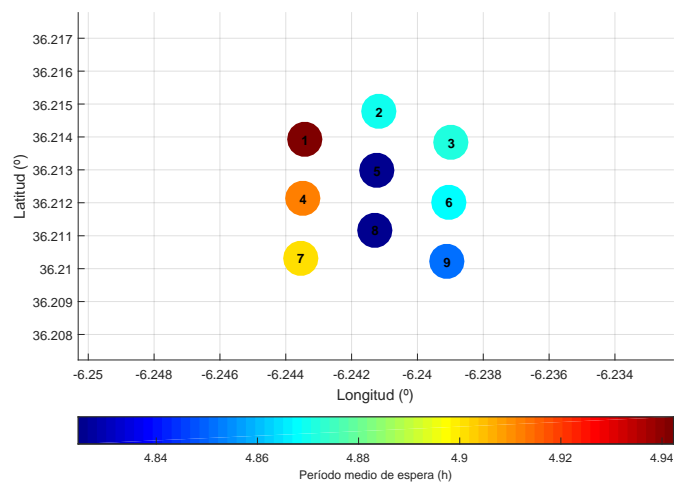


Figura B.74 Tiempo medio de espera distribución desal_2D (Ventana de 12 h).

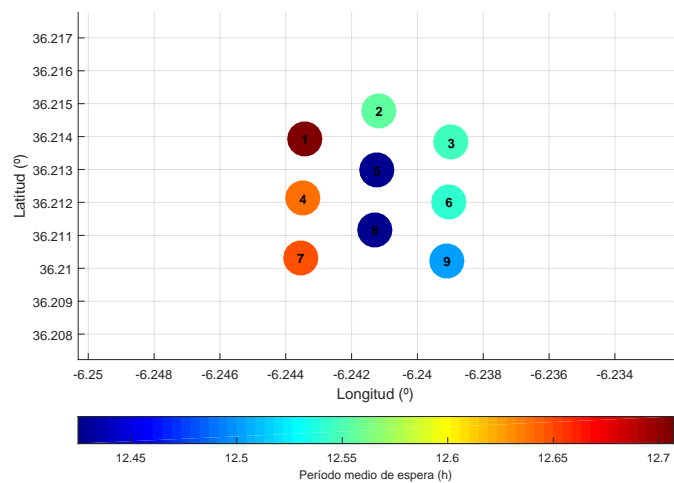


Figura B.75 Tiempo medio de espera distribución desal_2D (Ventana de 24 h).

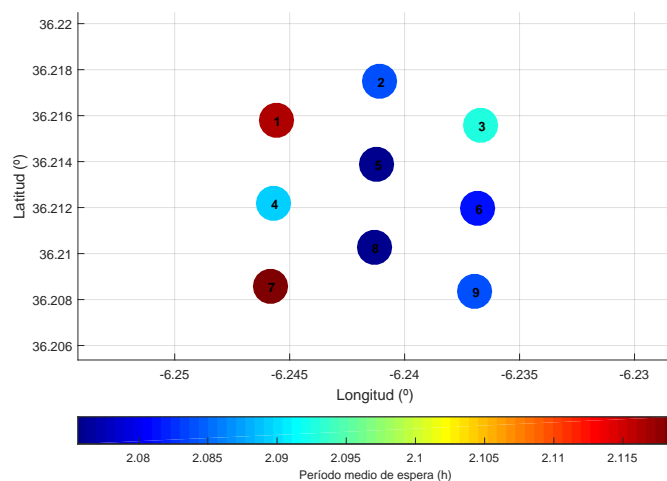


Figura B.76 Tiempo medio de espera distribución desal_4D (Ventana de 6 h).

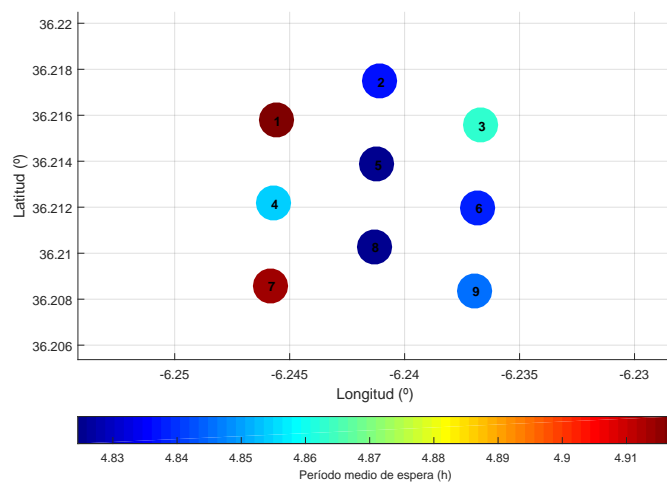


Figura B.77 Tiempo medio de espera distribución desal_4D (Ventana de 12 h).

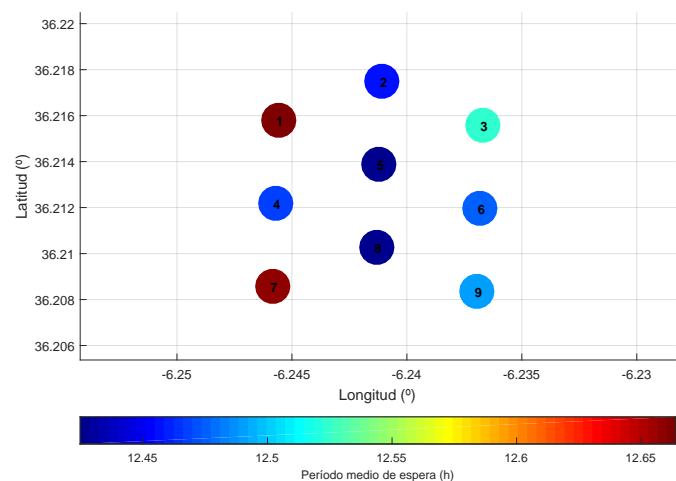


Figura B.78 Tiempo medio de espera distribución desal_4D (Ventana de 24 h).

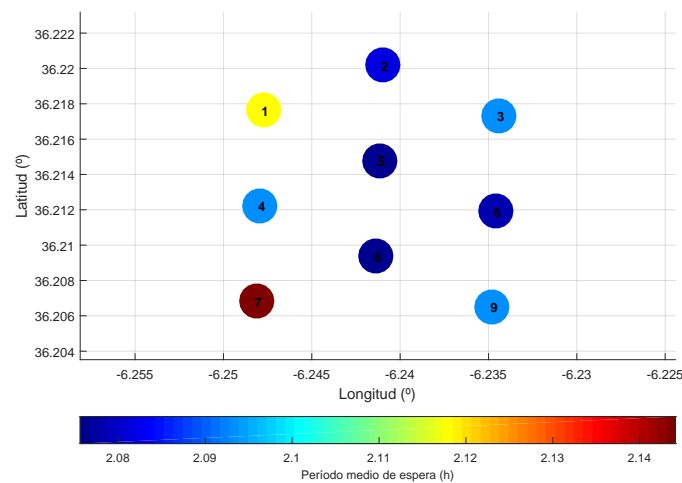


Figura B.79 Tiempo medio de espera distribución desal_6D (Ventana de 6 h).

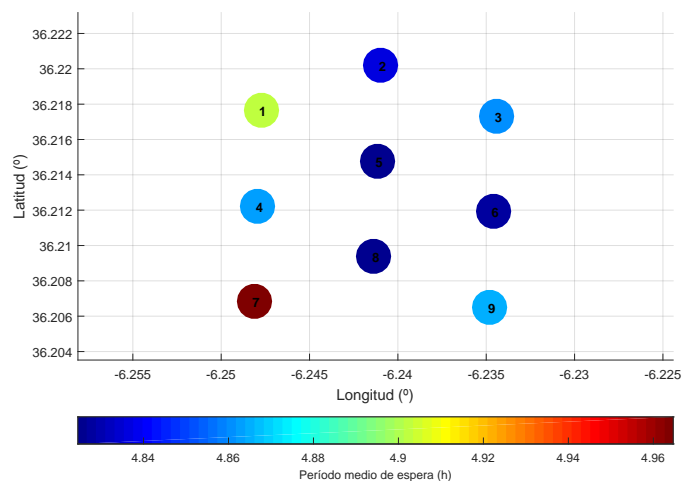


Figura B.80 Tiempo medio de espera distribución desal_6D (Ventana de 12 h).

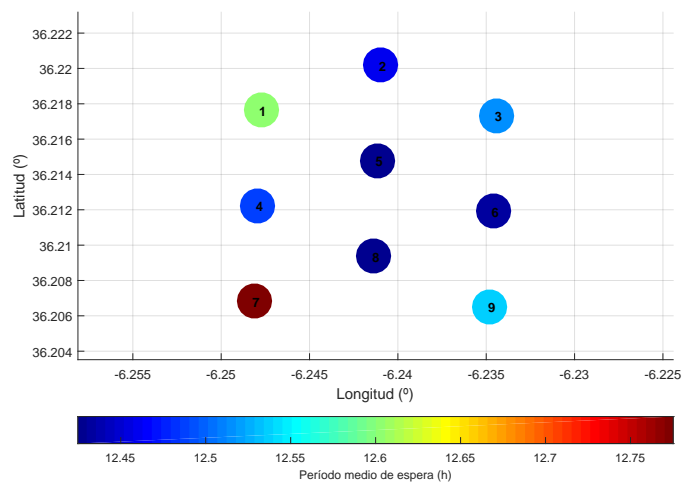


Figura B.81 Tiempo medio de espera distribución desal_6D (Ventana de 24 h).

Índice de Figuras

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1. | Evolución de la participación de las energías renovables en la UE | 1 |
| 1.2. | Participación de las energías renovables en España en 2010 | 2 |
| 1.3. | Participación de las distintas energías renovables en el panorama mundial en 2015 | 3 |
| 1.4. | Distribución del agua en la Tierra y su participación en la producción de energía | 3 |
| 2.1. | Área de estudio | 8 |
| 2.2. | Situación de la granja de dispositivos | 8 |
| 2.3. | Batimetría de la zona cercana a la granja | 9 |
| 2.4. | Puntos SIMAR de Puertos del Estado. <i>Fuente: Puertos del Estado</i> | 10 |
| 2.5. | Rosa de oleaje del SIMAR 5034009 | 11 |
| 2.6. | Distribución de Rayleigh del oleaje SIMAR 5034009 | 11 |
| 2.7. | Rosa de potencias SIMAR 5034009 | 12 |
| 2.8. | Energía acumulada para cada dirección SIMAR 5034009 | 12 |
| 3.1. | Grids modelo numérico | 14 |
| 3.2. | Modelo WaveCat. <i>Fuente: [12]</i> | 18 |
| 3.3. | División en sectores de la modelización del dispositivo | 19 |
| 3.4. | Distribución alineada | 20 |
| 3.5. | Distribución desalineada | 20 |
| 3.6. | Distribución trapezoidal | 21 |
| 3.7. | Propagación oleaje unitario distribución alineada | 21 |
| 3.8. | Propagación oleaje unitario distribución desalineada | 22 |
| 3.9. | Propagación oleaje unitario distribución trapezoidal | 22 |
| 3.10. | Definición de la coordenada σ . <i>Fuente: Manual de Delft3D-Flow</i> | 24 |
| 4.1. | P (kW/m) obtenida en 25 años en función del área | 28 |
| 4.2. | Función de ajuste P(A) | 28 |
| 4.3. | P (kW/m) acumulada distribución alineada | 29 |
| 4.4. | P (kW/m) acumulada distribución desalineada | 29 |
| 4.5. | P (kW/m) acumulada distribución trapezoidal | 30 |
| 4.6. | P (kW/m) por dispositivo y geometría | 30 |
| 4.7. | Diferencia de producción energética máxima | 30 |
| 4.8. | Producción anual distribución trap2D | 31 |
| 4.9. | Producción por meses distribución trap2D | 31 |
| 4.10. | P(kW/m) acumulada por dirección distribución trap2D | 32 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.11. | Dispositivo aislado para la comparación con los de la granja | 32 |
| 4.12. | Correlación (r) para la distribución trapezoidal | 33 |
| 4.13. | Correlación (r) para la distribución desalineada | 34 |
| 4.14. | Correlación (r) para la distribución alineada | 34 |
| 4.15. | RMSE para la distribución trapezoidal | 35 |
| 4.16. | RMSE para la distribución desalineada | 35 |
| 4.17. | RMSE para la distribución alineada | 35 |
| 4.18. | Inferencia estadística del q-factor para las distintas geometrías | 36 |
| 4.19. | Qfactor en función de la altura de ola para las distintas geometrías | 37 |
| 4.20. | Qfactor en función del período para las distintas geometrías | 37 |
| 4.21. | Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución trap2D | 38 |
| 4.22. | Energía por unidad de área separación 2D | 39 |
| 4.23. | Energía por unidad de área separación 4D | 39 |
| 4.24. | Energía por unidad de área separación 6D | 40 |
| 4.25. | Disponibilidad distribución trapezoidal 2D | 41 |
| 4.26. | Accesibilidad distribución trapezoidal (2D) | 42 |
| 4.27. | Número de ventanas de tiempo de 6 h | 43 |
| 4.28. | Número de ventanas de tiempo de 12 h | 43 |
| 4.29. | Número de ventanas de tiempo de 24 h | 43 |
| 4.30. | Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 6 h) | 44 |
| 4.31. | Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 12 h) | 44 |
| 4.32. | Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 24 h) | 45 |
| 4.33. | Altura de ola 99 percentil | 45 |
| 4.34. | Potencia producida (kW/m) 99 percentil | 46 |
| 4.35. | Variación media de la energía por la influencia de las corrientes | 48 |
| 4.36. | Variación media de la altura de ola por la influencia de las corrientes | 48 |
| 4.37. | Aumento máximo velocidad del flujo | 49 |
| 4.38. | Mapa de corrientes estado 1 | 49 |
| 4.39. | Mapa de corrientes estado 2 | 50 |
| B.1. | Producción anual distribución trap2D | 59 |
| B.2. | Producción anual distribución trap4D | 60 |
| B.3. | Producción anual distribución trap6D | 60 |
| B.4. | Producción anual distribución align2D | 61 |
| B.5. | Producción anual distribución align4D | 61 |
| B.6. | Producción anual distribución align6D | 62 |
| B.7. | Producción anual distribución desal2D | 62 |
| B.8. | Producción anual distribución desal4D | 63 |
| B.9. | Producción anual distribución desal6D | 63 |
| B.10. | Producción por meses distribución trap2D | 64 |
| B.11. | Producción por meses distribución trap4D | 64 |
| B.12. | Producción por meses distribución trap6D | 65 |
| B.13. | Producción por meses distribución align2D | 65 |
| B.14. | Producción por meses distribución align4D | 66 |
| B.15. | Producción por meses distribución align6D | 66 |
| B.16. | Producción por meses distribución desal2D | 67 |
| B.17. | Producción por meses distribución desal4D | 67 |
| B.18. | Producción por meses distribución desal6D | 68 |

| | | |
|-------|---|----|
| B.19. | P(kW/m) acumulada por dirección distribución trap2D | 68 |
| B.20. | P(kW/m) acumulada por dirección distribución trap4D | 69 |
| B.21. | P(kW/m) acumulada por dirección distribución trap6D | 69 |
| B.22. | P(kW/m) acumulada por dirección distribución align2D | 70 |
| B.23. | P(kW/m) acumulada por dirección distribución align4D | 70 |
| B.24. | P(kW/m) acumulada por dirección distribución align6D | 71 |
| B.25. | P (kW/m) acumulada por dirección distribución desal2D | 71 |
| B.26. | P (kW/m) acumulada por dirección distribución desal4D | 72 |
| B.27. | P (kW/m) acumulada por dirección distribución desal6D | 72 |
| B.28. | Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución align2D | 73 |
| B.29. | Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución align4D | 73 |
| B.30. | Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución align6D | 74 |
| B.31. | Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución desal2D | 74 |
| B.32. | Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución desal4D | 75 |
| B.33. | Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución desal6D | 75 |
| B.34. | Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución trap2D | 76 |
| B.35. | Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución trap4D | 76 |
| B.36. | Qfactor según la dirección de procedencia del oleaje distribución trap6D | 77 |
| B.37. | Disponibilidad distribución alineada 2D | 77 |
| B.38. | Disponibilidad distribución alineada 4D | 78 |
| B.39. | Disponibilidad distribución alineada 6D | 78 |
| B.40. | Disponibilidad distribución desalineada 2D | 79 |
| B.41. | Disponibilidad distribución desalineada 4D | 79 |
| B.42. | Disponibilidad distribución desalineada 6D | 80 |
| B.43. | Disponibilidad distribución trapezoidal 2D | 80 |
| B.44. | Disponibilidad distribución trapezoidal 4D | 81 |
| B.45. | Disponibilidad distribución trapezoidal 6D | 81 |
| B.46. | Accesibilidad distribución alineada (2D) | 82 |
| B.47. | Accesibilidad distribución alineada (4D) | 82 |
| B.48. | Accesibilidad distribución alineada (6D) | 83 |
| B.49. | Accesibilidad distribución desalineada (2D) | 83 |
| B.50. | Accesibilidad distribución desalineada (4D) | 84 |
| B.51. | Accesibilidad distribución desalineada (6D) | 84 |
| B.52. | Accesibilidad distribución trapezoidal (2D) | 85 |
| B.53. | Accesibilidad distribución trapezoidal (4D) | 85 |
| B.54. | Accesibilidad distribución trapezoidal (6D) | 86 |
| B.55. | Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 6 h) | 86 |
| B.56. | Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 12 h) | 87 |
| B.57. | Tiempo medio de espera distribución trap_2D (Ventana de 24 h) | 87 |
| B.58. | Tiempo medio de espera distribución trap_4D (Ventana de 6 h) | 88 |
| B.59. | Tiempo medio de espera distribución trap_4D (Ventana de 12 h) | 88 |
| B.60. | Tiempo medio de espera distribución trap_4D (Ventana de 24 h) | 89 |
| B.61. | Tiempo medio de espera distribución trap_6D (Ventana de 6 h) | 89 |
| B.62. | Tiempo medio de espera distribución trap_6D (Ventana de 12 h) | 90 |
| B.63. | Tiempo medio de espera distribución trap_6D (Ventana de 24 h) | 90 |
| B.64. | Tiempo medio de espera distribución align_2D (Ventana de 6 h) | 91 |
| B.65. | Tiempo medio de espera distribución align_2D (Ventana de 12 h) | 91 |

| | | |
|-------|--|----|
| B.66. | Tiempo medio de espera distribución align_2D (Ventana de 24 h) | 92 |
| B.67. | Tiempo medio de espera distribución align_4D (Ventana de 6 h) | 92 |
| B.68. | Tiempo medio de espera distribución align_4D (Ventana de 12 h) | 93 |
| B.69. | Tiempo medio de espera distribución align_4D (Ventana de 24 h) | 93 |
| B.70. | Tiempo medio de espera distribución align_6D (Ventana de 6 h) | 94 |
| B.71. | Tiempo medio de espera distribución align_6D (Ventana de 12 h) | 94 |
| B.72. | Tiempo medio de espera distribución align_6D (Ventana de 24 h) | 95 |
| B.73. | Tiempo medio de espera distribución desal_2D (Ventana de 6 h) | 95 |
| B.74. | Tiempo medio de espera distribución desal_2D (Ventana de 12 h) | 96 |
| B.75. | Tiempo medio de espera distribución desal_2D (Ventana de 24 h) | 96 |
| B.76. | Tiempo medio de espera distribución desal_4D (Ventana de 6 h) | 97 |
| B.77. | Tiempo medio de espera distribución desal_4D (Ventana de 12 h) | 97 |
| B.78. | Tiempo medio de espera distribución desal_4D (Ventana de 24 h) | 98 |
| B.79. | Tiempo medio de espera distribución desal_6D (Ventana de 6 h) | 98 |
| B.80. | Tiempo medio de espera distribución desal_6D (Ventana de 12 h) | 99 |
| B.81. | Tiempo medio de espera distribución desal_6D (Ventana de 24 h) | 99 |

Bibliografía

- [1] A. Babarit, *Impact of long separating distances on the energy production of two interacting wave energy converters*, Ocean Engineering (2010).
- [2] G. Besio and M.A. Losada, *Sediment transport patterns at trafilgar offshore windfarm*, Ocean Engineering (2008).
- [3] G. Besio, L. Mentaschi, and A. Massino, *Wave energy resource assesment in the mediterranean sea on the basis of a 35-year hindcast*, Energy (2015).
- [4] B. Borgarino, A. Babarit, and P. Ferrant, *Impact of wave interactions effects on energy absorption in large arrays of wave energy converters*, Ocean Engineering (2012).
- [5] S. Bozzi, M. Giassi, A. Moreno Miquel, A. Antonini, F. Bizzozero, G. Gruosso, R. Archetti, and G. Passoni, *Wave energy farm design in real wave climates*, Energy (2017).
- [6] K. Budal, *Theory for absorption of wave power by a system of interacting boides*, Journal of Ship Research (1977).
- [7] P. Camus, F.J. Mendez, R. Medina, and A.S. Cofiño, *Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate*, Coastal Engineering (2011).
- [8] P. Camus, F.J. Mendez, R. Medina, A. Tomas, and C. Izaguirre, *High resolution downscaled ocean waves (dow) reanalysis in coastal areas*, Coastal Engineering (2013).
- [9] A. de Andrés, R. Guanche, L. Meneses, C. Vidal, and I. Losada, *Factors that influence array layout on wave energy farms*, Ocean Engineering (2014).
- [10] J. Engstrom, M. Eriksson, M. Goteman, J. Isberg, and M. Leijon, *Performance of large arrays of point absorbing direct-driven wave energy converters*, Journal of Applied Physics (2013).
- [11] J. Falnes, *Radiation impedance matrix and optimum power absorption for interacting oscillator in surface waves*, Applied Ocean Research (1980).
- [12] H. Fernandez, G. Iglesias, R. Carballo, A. Castro, J. Fraguera, F. Taveira-Pinto, and M. Sanchez, *The new wave energy converter wavecat: concept and laboratory tests*, Marine Structures (2012).

- [13] M. Goteman, J. Engstrom, M. Eriksson, J. Isberg, and M. Leijon, *Methods of reducing power fluctuations in wave energy parks*, Journal of Renewable and Sustainable Energy (2014).
- [14] R. Guanche, A. De Andrés, IJ. Losada, and C. Vidal, *A global analysis of the operation and maintenance role on the placing of wave energy farms*, Energy Convers Manage (2015).
- [15] R.W. Kennard and L.A. Stone, *Computer aided design experiments*, Technometrics (1969).
- [16] G.J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P.A.E.M. Janssen, *Dynamics and modelling of ocean waves*, Cambridge University Press, 1994.
- [17] F.J. Lobo, F.J. Hernández-Molina, L. Somoza, J. Rodero, A. Maldonado, and A. Barnolas, *Patterns of bottom current flow deduced from dune asymmetries over the gulf of cadiz shelf (southwest spain)*, Marine Geology (2000).
- [18] A. López-Ruiz, R.J. Bergillos, and M. Ortega Sánchez, *The importance of wave climate forecasting on the decision-making process for nearshore*, Applied Energy (2016).
- [19] O'Connor M., Lewis T., and Dalton G., *Operational expenditure costs for wave energy projects and impacts on financial returns*, Renew Energy (2013).
- [20] L. Margheritini, D. Vicinanza, and P. Frigaard, *Ssg wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device*, Renewable Energy (2009).
- [21] C.C. Mei, *The applied dynamics of ocean surface waves*, Wiley, 1983.
- [22] M. Ortega-Sánchez, S. Fachin, F. Sancho, and M. Losada, *Relation between beachface morphology and wave climate at trafalgar beach (cádiz, spain)*, Geomorphology (2008).
- [23] Pacheco and Ferreira, *Hydrodynamic changes imposed by tidal energy converters on extracting energy on a real case scenario*, Applied Energy (2016).
- [24] N.A. Philips, *A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting*, Journal of Meteorology (1957).
- [25] G. Reikard, B. Robertson, and J. Bidlot, *Wave energy worldwide: Simulating wave farms, forecasting, and calculating reserves*, International Journal of Marine Energy In Review (2016).
- [26] D. Vicinanza, L. Margheritini, J.P. Kofoed, and M. Buccino, *The ssg wave energy converter: Performance, status and recent developments*, Energies (2012).